



Tielaitos

Pekka Halonen, Matti Huhtala, Vesa Laitinen

Dynaaminen rasitusindeksi (DRI)



**Tielaitoksen
selvityksiä**

74/1993

Helsinki 1993

**Tutkimuskeskus
VTT/TGL**

Tielaitoksen selvityksiä
74/1993

Pekka Halonen, Matti Huhtala, Vesa Laitinen

Dynaaminen rasitusindeksi (DRI)

Tielaitos
Tutkimuskeskus
VTT/TGL

Helsinki 1993

ISSN 0788-3722
ISBN 951-47-8130-9
TIEL 3200198
Painatuskeskus Oy
Helsinki 1993

Julkaisun kustannus ja myynti:
Tielaitos, hallinnon palvelukeskus,
painotuotepalvelut
Telefax (90) 1487 2652

Tielaitos

Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puh. vaihde (90) 148 721

Avainsanat akselipaino, dynaaminen kuormitus, kuorma-autot, matemaattiset mallit, tasaisuus, tien kunto

Tiivistelmä

Tämän tutkimuksen yhteydessä kehitettiin VTT:n suunnittelemaan ja rakentamaan palvelutasomittariin (PTM-auto) dynaaminen rasitusindeksi (DRI).

Tutkimuksen yhteydessä selvitettiin yleisimmät teillämme liikkuvat kuorma-autotyytit. Kuorma-auton tyyppiin vaikuttaa ratkaisevasti, mihin kuljetustehtävään se on tehty. Tavaralinjaliikenteessä ja puutavarakuljetuksissa 7-akselinen täysperävaunuyhdistelmä (3-akselinen vetoauto ja 4-akselinen perävaunu) on yleistynyt voimakkaasti. Varsinaisissa perävaunuissa paripyörät ovat yleisimmät. Konttikuljetuksissa 6-akselinen puoliperävaunuyhdistelmä (3-akselinen vetoauto ja 3-akselinen perävaunu) on selvästi yleisin. Puoliperävaunujen rengastuksena käytetään pääsääntöisesti paripyörän asemasta yksittäisasennettavaa rengasta, jonka kulutuspinnan leveys on yli 350 mm.

Rasitusindeksin laskennassa käytettävälle neljännesautomallille tarvittavia parametreja selvitettiin eri komponenttivalmistajilta. Teräsousista paraabelijouset ovat korvaamassa lehtijousen. Uusissa perävaunuissa ei perinteistä lehtijousta enää käytetä. Etenkin arkojen tavaroiden kuljetuksissa ilmajousien käyttö on lisääntynyt. Linja-autoissa ilmajousi on nykyisin selvästi yleisin jousityyppi. Kasvaneiden akselipainojen ja parempien ajo-ominaisuusvaatimusten myötä matalaprofiiliset renkaat ovat yleistyneet sekä ohjaavalla akselilla että paripyöräasennuksissa.

Vertailuaineistona dynaamisen rasitusindeksin kehitystyössä käytettiin VTT:n mittaushuorma-autosta mitattuja dynaamisia akselipainoja sekä erittäin kehittynyttä ADAMS-ohjelmistolla tehtyä kuorma-auton 3-ulotteista simulointimallia. VTT:n kuorma-auto on teknisesti vanhanaikainen (pieni rengaskoko, lyhyt teliväli ja lehtijousitus), joten vertailussa käytettiin pääasiassa ADAMS-mallin aineistoa.

Dynaamisen rasitusindeksin kehitystyössä oli lähtökohtana neljä erilaista mallivaihtoehtoa. Kaikille menetelmille on yhteistä PTM-autolla mitattava tien pituusprofiili.

Ensimmäisessä menetelmässä laskettiin pituusprofiilista spektri, joka kuvaa erilaisten aallonpituuksien määrää tiellä. Dynaaminen rasitusindeksi saatiin laskemalla kuorma-auton rungon ja akselien värähtelyiden ominaistajuuksia vastaavien aallonpituuksien määrää.

Toinen menetelmä perustui tien profiilille IRI-mallin kaltaisella QCS-mallilla (Quarter Car Simulation) simuloitaviin dynaamisiin akselipainoihin (liikkuvan auton tiehen kohdistamiin muuttuviin kuormiin). Dynaamisesta akselipainosta lasketaan kaikki tietä rasittavat yksittäiset huippuarvot, joiden avulla voidaan erotella esim. yhdestä isosta tai monesta pienestä epätasaisuudesta aiheutuvat ylimääräiset tien rasitusvaikutukset.

Myös kolmas menetelmä perustui QCS-mallista saatavaan dynaamiseen akselipainoon. Dynaamisen akselipainon RMS-arvo (Root Mean Square) kuvaa keskimääräistä dynaamista akselipainon vaihtelua.

Neljäntenä menetelmänä oli laskea rasitusindeksi QCS-mallilla saadusta dynaamisesta akselipainosta ns. neljännen potenssin menetelmällä. Korottamalla dynaamista akselipainoa neljänteen potenssiin suurten epätasaisuuksien rasitusvaikutus korostuu teiden rasitusteorian mukaisesti.

PTM-auton tämän hetkisen laskentakapasiteetin takia ei ensimmäistä ja toista menetelmää tarkemmin tutkittu. ADAMS-simuloinnin ja QCS-simuloinnin välille saatiin RMS-menetelmällä erittäin hyvä korrelaatio ($r^2 = 0,98$), mutta yksittäisiä epätasaisuuksia ei pystytty ottamaan riittävästi huomioon.

Neljännen potenssin menetelmässä yksittäiset epätasaisuudet erottuvat paremmin. Riippuvuus IRI:in todettiin epälineaariseksi. Dynaamisen rasitusindeksin laskennan perustaksi päätettiin ottaa neljännen potenssin menetelmä. Sen lisäksi rekisteröidään kunkin mitattavan 100 metrin koeosuuden dynaamisesta akselipainosta maksimiarvo ja sen paikka.

Alkusanat

Tien tasaisuuden vaikutusta ajomukavuuteen kuvataan kansainvälisellä tunnusluvulla IRI. Epätasaisuudesta aiheutuu kuitenkin rasituksia myös tierakenteelle ennen kaikkea raskaiden ajoneuvojen vaikutuksesta. Näillä rasituksilla on tunnetusti suuri vaikutus tien kestoikään. Tässä tutkimuksessa kehitettiin tunnusluku kuvaamaan tätä rasitusta. Tämä tunnusluku pystytään tuottamaan VTT:n kehittämällä palvelutasomittausautolla.

Tutkimuksen on tilannut tielaitos ja yhdyshenkilönä sekä työtä ohjanneen työryhmän puheenjohtajana on toiminut dipl.ins. Ismo Iso-Heiniemi. Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratoriossa tutkimuksesta on vastannut työryhmä, johon ovat kuuluneet johtava tutkija Matti Huhtala, tutkija Vesa Laitinen ja tutkimusinsinööri Pekka Halonen. Tutkimusta on ohjannut työryhmä, johon edellisten lisäksi on kuulunut tielaitoksesta ylitarkastaja Reijo Orama, erikoissuunnittelija Kari Hiltunen, dipl.ins. Juhani Pulkkanen ja päällysteinsinööri Raimo Ledentsä Kuopion tiepiiristä sekä VTT/TGL:stä dipl. ins. Jari Pihlajamäki, dipl.ins. Veikko Miettinen ja tutkimusinsinööri Antti Seise.

Tutkimusraportin ovat laatineet Matti Huhtala, Pekka Halonen ja Vesa Laitinen. VTT:n PTM-auton osalta kenttämittaukset ovat tehneet tutkimusavustajat Kimmo Lyra ja Tapio Jousinen. Kuorma-autolla tehdyistä rasitusmittauksista on vastannut Pekka Halonen. QCS-ohjelman parametrien määrittämiseen tarvittavat tietokoneohjelmat on tehnyt Veikko Miettinen. ADAMS-ohjelmistolla tehdyt kuorma-auton tietokonesimuloinnit on tehnyt Mauri Vesimäki MBS-Models Oy:stä.

Sisältö

1	JOHDANTO	7
2	RASKAAN KALUSTON TIERASITUKSIIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	9
2.1	Yleistä	9
2.2	Alustaprofiilit	10
2.3	Renkaat	11
2.4	Jouset	11
2.5	Iskunvaimentimet	13
2.6	Jousitusparametrit	14
3	TIEN RASITUSTEKIJÄT	16
3.1	Pituussuuntainen epätasaisuus	16
3.2	Akselipainon vaikutus tierakenteeseen	16
4	DYNAAMISET AKSELIPAINOT	20
4.1	Yleistä	20
4.2	Mittaukset	20
4.3	ADAMS-simulointi	21
4.4	QCS-simulointi	22
4.5	Dynaamisten akselipainojen vertailu	23
5	INDEKSIMALLIT	27
5.1	Yleistä	27
5.2	Tien profiiliin perustuva indeksimalli	27
5.3	Dynaamisesta akselipainosta laskettu indeksi	28
5.3.1	Tehollisarvo (RMS) menetelmä	29
5.3.2	Neljännän potenssin menetelmä	31
5.4	Mallin valinta	33
5.4.1	Parametrien valinta	33
5.4.2	Menetelmän valinta	35
6	JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET	38
7	KIRJALLISUUSLUETTELO	39
8	LIITTEET	41

1 JOHDANTO

Tiellä oleva epätasaisuus vaikuttaa tienkäyttäjän ajomukavuuteen, turvallisuuteen, kuorman vaurioitumisherkkyteen ja autolle sekä tielle aiheutuviin rasituksiin.

VTT:n kehittämä palvelutasomittausauto (PTM) mittaa tien pituusprofiiliin ja laskee sen perusteella tien tasaisuutta kuvaavan kansainvälisen tunnusluvun IRI:n (International Roughness Index). Tämä tunnusluku kuvaa autoilijan tuntemaa ajomukavuutta. Indeksien laskenta perustuu jollain käytettävissä olevalla keinolla tuotettuun tien pituusprofiiliin. Pituusprofiiliin sijoitetaan laskennallisesti kulkemaan vakionopeudella (80 km/h) etenevä määrätyillä rengas-, jousi- ja iskunvaimennusominaisuuksilla varustettu ns. neljännesauto (Reference Quarter Car Simulator, RQCS). Tämän standardiajoneuvon neljänneksen (eli auton yhden pyörän ja korin) korin ja pyörän välisistä pystysuuntaisista liikkeistä lasketaan jousitetun ja jousittamattoman massan välinen liike. IRI-arvo on pystysuuntainen liike pituusyksikköä kohti ja sen yksikkö on mm/m tai m/km.

VTT:n palvelutasomittausautolla tasaisuustiedon keruu päällysteen pinnasta tapahtuu palvelutasomittariin (PTM-auto) asennetun laserkameran ja kiihtyvyysanturin avulla. Laser- ja kiihtyvyysanturi on asennettu auton koriin oikean etupyörän eteen. Laserilla mitataan tien pinnan ja korin välistä etäisyyttä ja kiihtyvyysanturilla korin pystysuuntaista liikettä. Mittaustiheys on 40 mm ja mittaukset tehdään samanaikaisesti sekä laserilla että kiihtyvyysanturilla. Näiden kahden mitatun profiilin erotuksena voidaan laskea tien pituus-suuntainen profiili 32 cm:n välein.

Kun kuorma auto liikkuu tiellä, siitä tielle aiheutuva kuorma ei ole tasainen, vaan voi vaihdella hyvälläkin tiellä ± 20 %. Vaikka keskiarvo on sama kuin staattinen arvo, aiheutuu dynaamisesta kuormasta lisärasitus tierakenteelle. Tällä lisärasituksella on merkittävä vaikutus tierakenteen kokonaiskestoikään. Tielle tulevien rasitusten laskemista varten ei ole olemassa kansainvälistä indeksiä. VTT on kehittänyt palvelutasomittausautoon IRI-mittausalgoritmiä soveltaen tietokoneohjelman, joka laskee dynaamisen akselipainon ja siitä edelleen ns. neljänneksen potenssin sääntöä käyttäen tierakenteen dynaamisen rasituksen. Mallin lähtökohtana on tietyn amerikkalaisen kuorma-auton ominaisuudet (GM-malli), jota on kehitetty edelleen vastaamaan jousitusominaisuuksiltaan nykyaikaista kuorma-autoa.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli määrittää dynaaminen rasitusindeksi (DRI), joka kuvaa tierakenteelle raskaan liikenteen vaikutuksesta syntyviä rasituksia. Indeksien avulla on tarkoitus saada tietoa määrätyn tiejakson

(100 m) keskimääräisestä dynaamisesta lisärasituksesta. Lisäksi pyritään saamaan selville yksittäiset rasituksen ja samalla rakenteen kestävyyskannalta kriittiset kohdat sekä dynaamisten voimien suuruudet näillä kohdilla.

Dynaaminen rasitusindeksi määritetään matemaattisen mallin avulla. Mallilla simuloidaan kuorma-autoa. Malli perustuu IRI-mallin tavoin neljännesautoon. Jotta malli saadaan kehitettyä kuvaamaan käytössä olevaa autokantaa, tehtiin aluksi selvitys tällä hetkellä käytössä olevasta ajoneuvokalustosta, kuten alustaprofiileista, jousituksista ja iskunvaimentimista.

Mallin kehittämisessä käytettiin apuna todellisia rasitusmittauksia instrumentoidulla kuorma-autolla sekä erilaisia tietokonesimulaatioajoja todellisilla mitatuilla tieprofiileilla. Kehitettyjen erilaisten mallien soveltuvuutta käyttötarkoitukseen testattiin näiden keinojen avulla.

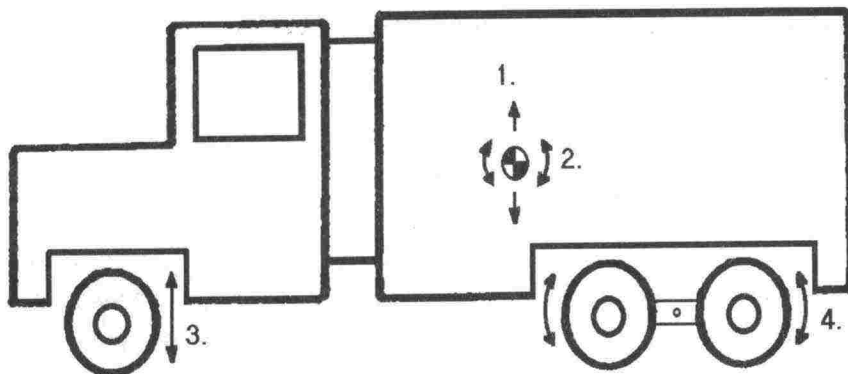
2 RASKAAN KALUSTON TIERASITUKSIIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

2.1 Yleistä

Raskaalla kalustolla tarkoitetaan tässä tutkimuksessa kuorma-autoja sekä niihin kytkettyjen perävaunujen muodostamia yhdistelmiä, joiden kokonaismassat ylittävät 16 tonnia. Linja-autojen on oletettu pääsääntöisesti ajavan vaillinaisilla kuormilla, mitä tulee sallittuihin akselimassoisiin, joten niitä ei ole otettu huomioon tässä tutkimuksessa. Nykyaikaisessa linja-autossa käytetään yksinomaan ilmajousitusta, joten tältäkin kannalta ne ovat tieystävällisiä.

Tien epätasaisuudet toimivat kuorma-autoon kohdistuvina heräteinä, joista kuorma-auton liike-energia suuntautuu osin tiehen aiheuttaen dynaamisia lisärasituksia tielle. Näiden dynaamisten lisäkuormien voimakkuuteen ja taajuuteen vaikuttaa kuorma-auton heilahteludynamiikka. Kuvassa 1 on esitetty kuorma-auton heilahteludynamiikassa tyypillisiä ilmiöitä.

Aallonpituudeltaan pitkissä epätasaisuuksissa koko auton runko joustaa pystyakselin suuntaisesti (nuolet 1). Lehtijousituksella liikkeen taajuus vaihtelee välillä 2 - 3 Hz. Ilma- ja paraabelijousituksilla taajuus on yleensä alle 2 Hz. Etu- ja taka-akselien erilaisen jousitusparametrien takia suurissa yksittäisepätasaisuuksissa kuorma-auton runko pyrkii kiertymään painopisteensä ympäri, mikä ilmenee etupään nyökkimisena (nuolet 2). Taajuudeltaan nyökkiminen on hieman koko rungon joustoa suurempaa (2 - 4 Hz). Tapaus 3 kuvaa tilannetta, jossa pyörä osuu esimerkiksi reikään aiheuttaen pyörän pomppimista mutta ei rungon pystyliikettä. Pyörän pomppimistaajuus on kuorma-autoilla noin 10 Hz. Kuorma-auton telissä akselit on mekaanisesti kytketty yhteen. Tämän seurauksena sellaiset tien epätasaisuudet, jotka vaikuttavat kerrallaan vain yhteen telin akseliin, aiheuttavat telin keinumista (nuolet 4). Telin keinuntataajuus on hieman pyörän pomppimistaajuutta pienempää (7 - 10 Hz).



Kuva 1: Kuorma-auton heilahteludynamiikan ominaisuuksia.

2.2 Alustaprofiilit

Indeksimallin säätöä varten tutkimuksessa selvitettiin Suomessa käytössä olevan raskaan kaluston yleisimmät akselistoprofiilit. Apuna käytettiin Tielaitoksen tutkimuskeskukselta saatua kuorma-autojen tyyppiluokitus-yhteenvetoa (liite 1, /1/). Sen perusteella ei voitu vielä selvittää kuorma-autojen eri akseleilla olevaa rengastusta. Tämän vuoksi tehtiin reitiltä Otaniemi - Kotka (Vt 7) - Otaniemi (Kehä III) otos vastaan tulleista kuorma-autoista (liite 2). Otoksessa on mukana yhteensä 351 raskaaseen kalustoon luokiteltavaa ajoneuvoa. Otoksessa oli kuorma-autoja 114 kpl, puoliperävaunuyhdistelmiä 75 kpl ja täysperävaunuyhdistelmiä 162 kpl.

Tutkimuksen perusteella tyypillisin kuorma-auto oli 2-akselinen kuorma-auto (liite 1, tyyppi 1). Tyypillisimmäksi puoliperävaunuyhdistelmäksi osoittautui 3-akselisella vetoautolla (paripyöräteli) ja 3-akselisella perävaunulla (yksittäisasennettavat renkaat) varustettu yhdistelmä (liite 1, tyyppi 12). Täysperävaunuyhdistelmistä yleisin oli 3-akselisella vetoautolla (paripyöräteli) ja 4-akselisella perävaunulla (paripyörätelit edessä ja takana) varustettu yhdistelmä (liite 1, tyyppi 22). Eri ajoneuvotyyppien jakautuminen ja yleisyys on esitetty taulukossa 1. Esimerkiksi täysperävaunuja oli otoksessa 46 %, yleisintä täysperävaunutyyppiä oli otoksesta 15 % ja yleisintä täysperävaunutyyppiä oli täysperävaunuista 33 %.

Taulukko 1: Raskaan kaluston tyyppien jakautuminen tutkimuksen yhteydessä tehdyssä otannassa.

Ajoneuvotyyppi / Osuudet	Kuorma-autot kpl (%)	Puolipv:t kpl (%)	Täyspv:t kpl (%)
Osuus otoksessa	114 (32 %)	75 (21 %)	162 (46 %)
Yleisimmän osuus otoksesta	49 (14 %)	42 (12 %)	54 (15 %)
Yleisimmän osuus tyypistä	43 %	56 %	33 %

2.3 Renkaat

Perinteisessä kuorma-auton rengastuksessa voidaan käyttää samaa rengasta yksittäin tai pariasennettuna. Pariasennuksella on voitu lisätä akselin kantavuutta. Varsinkin puoliperävaunuissa on paripyörän asemasta normaalia leveämpi yksittäisasennettava rengas yleistynyt voimakkaasti. Eräät kuljetustehtävät esimerkiksi puutavarakuljetukset vaativat rengastukselta hyvää ajoneuvon kallistelun sietoa, jolloin on käytettävä paripyöriä suuremmista rengaskustannuksista huolimatta. Yleistymään päin ovat olleet myös matalaprofiilisemmat pariasennettavat renkaat, jolloin voidaan tehdä matalampia ajoneuvon runkorakenteita ja sitä kautta suurempia kuormatiloja. Tutkimuksen yhteydessä rengastukset jaettiin kahteen luokkaan: Yksittäispyörät ja paripyörät.

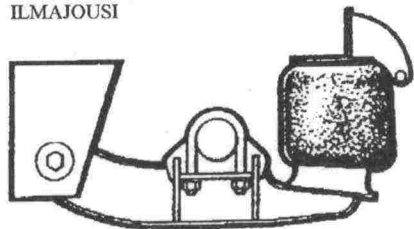
Yksittäispyörällä varustettuja akseleita oli kuorma-autoissa ja yhdistelmien vetoautoissa 25 % (438 kpl) ja perävaunuissa 12 % (212 kpl). Paripyörällä varustettuja akseleita oli kuorma-autoissa ja yhdistelmien vetoautoissa 33 % (576 kpl) ja perävaunuissa 30 % (529 kpl). Kaikkiaan akseleita oli 1755 kpl, joista yksittäispyörällisiä 37 % (650 kpl) ja paripyörällisiä 63 % (1105 kpl).

2.4 Jouset

Pääsääntöisesti raskaan kaluston jouset voidaan jakaa teräs- ja ilmajousiin. Perinteisesti käytetyin jousityyppi kuorma-autoissa on ollut teräksinen lehtijousi (Kuva 2, keskimäinen jousi). Sen hyvinä puolina ovat yksinkertainen rakenne ja toimiminen myös vaimentimena. Toisaalta, koska sen vaimennuskyky perustuu jousen lehtien väliseen kitkaan, lepokitka kasvaa jousen vanhetessa ruosteen ja lian vaikutuksesta. Lehtijousi on joustokuvaajaltaan lineaarinen (kuva 3), jolloin se joudutaan suunnittelemaan suurelle kuormitustasolle. Tämän seurauksena lehtijousi on liian jäykkä kevyellä kuormalla ajettaessa,

ollen näin ajomukavuudeltaan huono. Apujousta käyttämällä saadaan kuvan 3 mukainen taattuva joustokuvaaja, jossa eräässä toimintapisteessä apujousi alkaa kantaa pääjousen mukana. Tällöin jousi on keskimäärin sopiva kevyellä ja raskaalla kuormalla. Koska lehtijousten työkyky on heikko painoon nähden ja akselikonstruktiosta johtuen ne kuuluvat ns. jousittamattomaan massaan, ovat ne huonon ajomukavuuden lisäksi myös tierasitusten kannalta huonot.

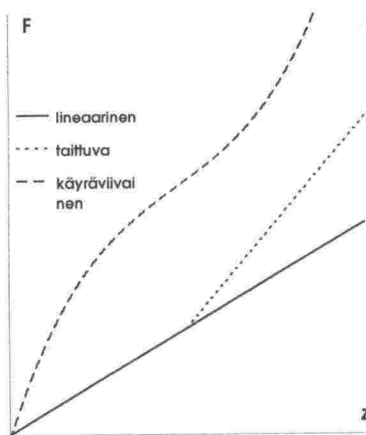
ILMAJOUSI



LEHTIJOUSI



PARAABELIJOUSI



Kuva 2: Ilma-, lehti- ja paraabelijousi.

Kuva 3: Jousen joustokuvaajat.

Edellä mainituiden syiden takia paraabelijousi (kuva 2, alin jousi), jossa jousen lehden paksuus on muuttuva, on yleistynyt viimeaikoina voimakkaasti. Sillä päästään paremmin progressiiviseen joustokuvaajaan (kuva 3, käyräviivainen joustokuvaaja), jolloin joustojäykkyys pysyy vakiona kuormituksen muuttuessa. Tällöin akseliston ominaistuuus pysyy myös lähes vakiona joustosta huolimatta. Koska paraabelijousessa jousilehdet eivät hankaa toisiaan, ei sillä ole riittävää vaimennuskykyä, vaan joudutaan käyttämään erillistä vaimenninta. Paremman joustokuvaajan ja kunnon vaimennuksen sekä jousen keveyden ansiosta paraabelijousitus on lehtijousitusta parempi tierasitusten kannalta.

Varsinkin sellaisissa kuljetustehtävissä, joissa vaaditaan hyvää ajomukavuutta käytetään ilmajousitusta yleisesti (kuva 2, ylin jousi). Ilmajousen avulla jousitetun massan ominaistuuus saadaan hyvin alhaiseksi, jolloin nopeissa dynaamisissa kuormituksissa jouset toimivat pehmeästi. Ilmajousen suurimpana haittana on sen kalleus, sillä teräsousista poiketen akselin tuenta joudutaan tekemään erikseen. Lisäksi ilmajousitus vaatii pehmeytensä vuoksi kallistuksen vaimennuksen.

Tutkimuksen yhteydessä selvitettiin kyselynä kuorma-autojen ja perävaunujen valmistajilta ja maahantuojilta heidän edustamiensa merkkien jousitustyyppien yleisyyttä. Taulukossa 2 on esitetty uusien kuorma-autojen ja perävaunujen jousitustyyppien jakautuminen paraabeli-, lehti- ja ilmajousiin.

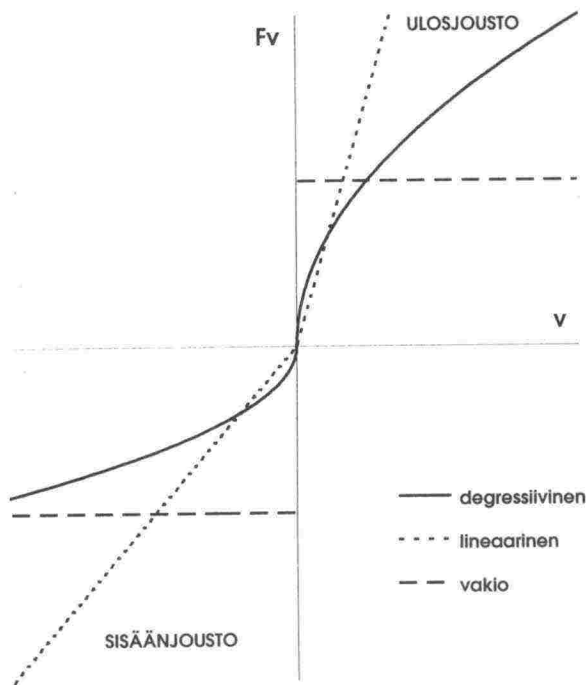
Taulukko 2: Uusien kuorma-autojen ja perävaunujen jousitustyyppit.

Jousitus Ajoneuvo	Scania	Sisu	Volvo	Perävaunut
Paraabelijousi	80 %	60 %	60 %	70 %
Lehtijousi	5 %	35 %	5 %	0 %
Ilmajousi	15 %	5 %	35 %	30 %

2.5 Iskunvaimentimet

Jousen lisäksi nykyaikainen jousitus vaatii kunnollisen vaimennuksen, ollakseen sekä ajomukavuudeltaan ja ajoturvallisuudeltaan että tierasitusten kannalta mahdollisimman hyvä. Perinteisessä lehtijousituksessa vaimennustyö tehdään lehtien välisen kitkan avulla. Uudella jousella kitkakerroin vaihtelee välillä 0,12 - 0,15, kun taas vanhalla jousella kitkakerroin voi olla 0,2 - 0,25. Tämän seurauksena lehtijousien toiminta vaimentimena ei välttämättä vastaa suunniteltua jousien alkaessa ikääntyä. Lehtijousen vaimennusvoima on joustoliikkeen nopeudesta riippumaton (kuva 4, vaimennusvoima vakio) ts. jousi vaimentaa samalla voimalla pieniä ja nopeita iskuja sekä hitaita ja syviä joustoliikkeitä.

Paraabeli- ja ilmajousen oma vaimennuskyky on lähes olematon, joten niiden rinnalla on käytettävä erillistä vaimenninta. Tällöin voidaan vaimennin valita sopivaksi erilaisiin kuormitustilanteisiin. Lisäksi erillinen vaimennin on helposti vaihdettavissa, mikäli vaimennin menettää tehonsa. Kuorma-autoissa käytettävät iskunvaimentimet ovat kuvan 4 mukaisesti degressiivisiä nestevaimentimia. Nopeat iskut vaimennin vaimentaa heikommin kuin hitaat, pitkät iskut. Näin saadaan myös tierasitusten kannalta vaarallinen korin nyökintä parhaiten vaimennettua. Epälineaarisuuden lisäksi ajoneuvoissa käytettävät vaimentimet ovat epäsymmetrisiä. Akselin ulosjousto vaimennetaan voimakkaammin kuin sisäänjousto, jolloin vaimennin ei jäykistä jousta liikaa sisäänjoustossa.



Kuva 4: Iskunvaimentajan toimintakuvaajat.

2.6 Jousitusparametrit

Tierasitusten simuloinnin mahdollistamiseksi ja tyypillisten parametriarvojen löytämiseksi tutkimuksessa selvitettiin käytössä olevia eri komponenttien tunnuslukuja. Tarvittavia parametreja ovat jousitettu massa (= korin ja rungon massa), jousittamaton massa (= akseli ja pyörät), jousen jäykkyys, iskunvaimentajan jäykkyys sekä renkaan jousto- ja vaimennusjäykkyys. Tiedot kerättiin sekä kuorma-autovalmistajien että komponenttivalmistajien kautta. Tyypillisimmät parametrien arvot on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3: Kuorma-autojen tyypilliset jousitusparametrit.

Parametrit	Etuakseli (8t)	Vetoakseli (10t)	Teli (18t, 55/45%)
Jousen jousivakio (N/mm)	210 lehtijousi (6t), 270 - 330 paraabeli, 200 ilma	700 lehtijousi, 900 paraabeli	2000 paraabeli, 1400 ilma
Jousittamaton massa (kg)	700 - 800	1200 - 1300	-
Renkaan jousivakio (N/mm)	1000 - 1500	1000 - 1500	1000 - 1500
Iskunvaimentimen vaim.kerroin(Ns/m) paraabelijousitus	14000 veto, 3500 puristus	14000 veto, 3500 puristus	
Renkaan vaim.kerroin (Ns/m)	1000	1000	

3 TIEN RASITUSTEKIJÄT

3.1 Pituussuuntainen epätasaisuus

Tien pituussuuntaisella epätasaisuudella tarkoitetaan vertikaalisuuntaisia muutoksia tien pituusprofiilissa. Epätasaisuus on jaettavissa eri luokkiin aallonpituuden mukaan. Taulukossa 4 on esitetty PIARC:n kehittämä luokittelu. Kaaviokuva epätasaisuuden luokittelusta ja sen vaikutuksesta tien palvelutasoon on esitetty liitteessä 3. Tiellä on hyvin erilaista epätasaisuutta; esimerkiksi aivan pieniä töyssyjä (lyhyt aallonpituus) ja pitkiä painumia (suuri aallonpituus). Usein tiellä on varsin monia eri aallonpituuksia. Nämä eri aallonpituudet vaikuttavat eri tavalla ajomukavuuteen sekä siihen, minkälaisia rasituksia niistä aiheutuu tierakenteelle raskaiden ajoneuvojen vaikutuksesta.

Taulukko 4: PIARC:n luokittelu tien epätasaisuudelle ja karkeudelle.

Epätasaisuusluokka	Aallonpituus (λ)
Mikrokarkeus	0 - 0,5 mm
Makrokarkeus	0,5 - 50 mm
Megakarkeus	50 - 500 mm
Lyhyt epätasaisuus	0,5 - 5 m
Keskipitkä epätasaisuus	5 - 15 m
Pitkä epätasaisuus	15 - 50 m
Geometria	yli 50 m

3.2 Akselipainon vaikutus tierakenteeseen

Tie ei vaurioidu suurimman kuormituksen vaikutuksesta toisin kuin useat muut rakenteet vaan toistuvien kuormitusten seurauksena; vaurioituminen on siis luonteeltaan väsymistä. Suuremmilla kuormituksilla on luonnollisesti enemmän vaikutusta väsymiseen kuin pienillä.

AASHOn tiekokeessa 1958 - 1960 /2/ vertailtiin neljän yksittäisakselipainon ja neljän teliakselipainon vaikutuksia erilaisiin tierakenteisiin. Saadusta hyvin suuresta aineistosta muodostettiin myöhemmin ns. neljännen potenssin sääntö (kaava 1) eli

$$\left(\frac{P_a}{P_b} \right)^4 = \frac{N_b}{N_a}, \quad (1)$$

jossa P_a ja P_b ovat akselipainoja ja N_a ja N_b tierakenteen rikkoontumiseen tarvittavia vastaavien akselipainojen ylityksiä.

Tämän säännön mukaan akselipainon kaksinkertaistuessa tien elinikä pienenee 2^4 eli kuudenteentoistaosaan. AASHOn tiekokeesta saatu neljännen potenssin säännön eksponentti ei ollut suinkaan vakio, vaan vaihteli välillä 3,6 - 4,6. Vaikka eksponentti ei olekaan välttämättä neljä, puhutaan edelleen neljännen potenssin säännöstä.

Neljännen potenssin sääntöä on myöhemmin lähestytty myös muilla tavoin. Asfaltin väsytyksokeissa rasitetaan koekappaletta toistuvilla kuormituksilla. Väsytyssuoran kulmakertoimen käänteisluku voidaan tulkita neljännen potenssin säännön eksponentiksi. Laboratoriokokeissa mm VTT:n mittauksissa /3/ eksponentin on todettu olevan yleensä välillä 5 - 8. Tierakennemateriaalit eivät ole kuitenkaan lineaarisia ominaisuuksiltaan, vaan niiden kimmomoduulit ovat riippuvaisia jännitystasosta. Tämä on voitu todeta mm. Virttaalla tehdyissä mittauksissa /4/. Tällöin todellinen eksponentti pienenee ja saa usein lähellä neljää olevan arvon.

Väsymissuorat voidaan saada myös koetieaineistoista esim. Suomessa havaintokoeteistä /5/. Tällöin lasketaan erikseen sitomattomien kerrosten ja pohjamaan väsymissuorat. Havaintokoetieaineistossa tulosten hajonta on suuri. Tulokset vastaavat kuitenkin suuruusluokaltaan neljännen potenssin sääntöä.

Vastaavissa muissa tutkimuksissa on päädytty tuloksiin, jotka eivät ole oleellisesti ristiriidassa neljännen potenssin säännön kanssa.

OECD:n Ranskassa tekemässä koetiekonetutkimuksessa /6/ vertailtiin kahden akselipainon vaikutusta tierakenteen rikkoontumiseen. VTT analysoi projektissa kyseisen aineiston. Tulokseksi tuli, että eksponentin arvo on suuresti riippuvainen siitä, miten huonoon kuntoon päällysrakenne päästetään kokeen aikana. Eksponentti vaihteli välillä 1,8 - 8,8 siten, että tien kunnon ollessa hyvän arvo on pienempi ja sen ollessa huonon arvo on suurempi. Kun tarkasteltiin sitä vaihetta, jolloin tie yleensä päällystetään uudelleen, päädyttiin arvoon, joka on suuruusluokaltaan neljä.

AASHOn kokeen kaltaista tutkimusta ei ole taloudellisista syistä voitu tehdä myöhemmin. Muissa tutkimuksissa on saatu neljästä poikkeavia lukuja.

Mitkään niistä eivät ole olleet niin vakuuttavia eivätkä tulokset niin paljon poikkeavia, että luvusta neljä olisi syytä poiketa. Siten se on edelleen täysin hyväksytty, joskin sitä on pidettävä epämääräisenä monen tutkimuksen keskiarvona eikä minään luonnon vakiona.

Edellä esitetty koskee ainoastaan bitumisilla sideaineilla tehtyjä teitä. Mikäli tiessä käytetään maabetonia, eksponentin arvo on huomattavasti suurempi, ehkä noin 10. Betoniteillä eksponentti on vielä suurempi. Maabetonia ja betonia koskevat tutkimusaineistot ovat pienehköjä eikä arvoista ole kansainvälistä yksimielisyyttä.

AASHOn kokeessa ajettiin sen aikaisilla kuorma-autoilla, joiden jousitus oli nykyisiä huonompi ja siten dynaamiset akselipainot suurempia. Samalla koealueella käytettiin samanlaisia autoja. Kokeissa ajettiin vakionopeudella 35 mailia tunnissa, joten suurimmat dynaamiset akselipainot sattuivat ilmeisesti aina samoille kohdille. Siten kokeessa saadut arvot sisältävät huomattavan dynaamisen lisän.

Havaintokoeteilla ja vastaavilla muilla koeteilla on normaali liikenne, joten niillä dynaaminen lisä on todenmukainen. Koska tieto perustuu yleensä ainakin 10 vuoden liikenteeseen, tietä kuormittava kalusto ei ole samaa esim. jousituksen suhteen kuin nykyisin.

Laboratoriossa tehdyillä kokeilla simuloidaan tasaista liikennettä samoin kuin Virtaan kaltaisilla mittauksilla. OECD:n kokeessa jousitus oli erinomainen ja siten dynaamisten rasitusten vaikutus pieni.

Dynaamisesti vaihteleviin kuormiin ei ole aikaisemmin osattu kiinnittää huomiota esim. AASHOn tiekokeen aineistoa tulkittaessa. Tämän hetkisen tietämyksen perusteella ei siten olla varmoja, voidaanko myös dynaamisesti vaihteleviin kuormituksiin soveltaa neljännessä potenssin sääntöä. Tällä hetkellä se on kuitenkin ainut perusteltu lähestymistapa.

Akselipaino ei siis ole joka paikassa sama, vaan se voi vaihdella ± 20 % hyväksyttävällä eli todellinen tietä rasittava akselipaino voi vaihdella välillä 8 - 12 tonnia staattisen 10 tonnin asemesta. Suurimmat kuormat voivat keskittyä aina samoille kohdille tietä. Tästä kuormitusten keskittymisestä tiedetään toistaiseksi varsin vähän (vrt. mm. viitteet 7 ja 8).

Dynaamisesti vaihtelevien akselipainojen suuruus on riippuvainen paitsi tien epätasaisuudesta myös auton jousituksesta. Euroopan Unioni sallii ilmajousitetulle akselille tai vastaaville tieystävällisille akseleille suuremman akselipainon eräissä tapauksissa.

Dynaamisesti vaihtelevien akselipainojen merkitystä ei vielä tunneta hyvin. Asiaa on käsitellyt OECD:n työryhmä, joka on tehnyt julkaisun /9/ ja on alkamassa yhteistä DIVINE-tutkimusohjelmaa. VTT on aktiivisesti siinä mukana tielaitoksen rahoittamana.

4 DYNAAMISET AKSELIPAINOT

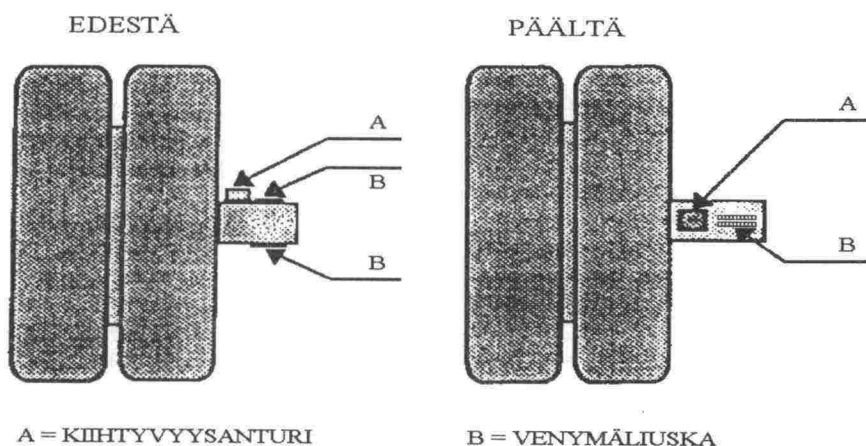
4.1 Yleistä

Rasitusindeksin kehittämistä varten tutkimuksessa käytettiin vertailuaineistona kahden eri menetelmän avulla tuotettuja dynaamisia akselipainoja. Dynaamisella akselipainolla tarkoitetaan liikkuvan auton akselin hetkellistä tiehen kohdistamaa voimaa, joka vaihtelee tien epätasaisuuden, auton jousituksen, ajonopeuden yms. vaikutuksesta. Tätä dynaamisen ja staattisen akselipainon erotusta kutsutaan tässä yhteydessä dynaamiseksi lisäkuormaksi. Ensimmäisenä menetelmänä käytettiin suoraan liikkuvasta kuorma-autosta tehtyjä akselipainomittauksia. Toisena menetelmänä oli dynaamisten akselipainojen simulointi todellisesta kuorma-autosta mallinnetulla 3-ulotteisella mallilla. Tämä malli vastaa erittäin nykyaikaista tuotannossa olevaa kuorma-autoa. Simulointiin käytettiin erilaisten monikomponenttirakenteiden suunnitteluun kehitettyä kaupallista ADAMS-ohjelmistoa.

4.2 Mittaukset

Tasaisuusmittarivertailu-tutkimuksen yhteydessä tehtiin VTT:n kuorma-autolla dynaamisia akselipainomittauksia /10/. Mitatut koeosuudet muodostuvat palvelutasoltaan hyvin erilaisista teistä, sisältäen kukin viisi 100:n metrin osuutta (koeosuudet 53_1, 53_2, 143 ja 170). Koeosuuksien IRI-arvot vaihtelivat välillä 0,83 - 6,17. Näitä mittaustuloksia käytetään hyväksi tässä tutkimuksessa. Dynaamisten akselipainojen mittaukset on tehty VTT:n kolmiakselisella, nostotelillä varustetulla kuorma-autolla (Sisu M-162). Jousituksena on perinteiset lehtijouset etuakselilla sekä telissä, lisäksi etuakselilla on iskunvaimentimet. Mittauksia varten kuorma-auto oli kuormattu mahdollisimman lähelle lain sallimaa maksimimassaa 22000 kg, akseli-massojen jakautuessa etuakselille 5600 kg, vetoakselille 9200 kg ja teliakselille 7500 kg. Rengaspaineet olivat vastaavasti 700, 800 ja 700 kPa.

Tavallisin tapa dynaamisen akselipainon mittaamiseksi on mitata kuormituksen aiheuttama akselin taipuma. VTT:n kuorma-autossa akselin taipuma mitataan kuvassa 5 esitetyn periaatteen mukaisesti asennetuilla venymäliuskoilla. Staattisessa tilanteessa venymäliuskoilla saadaan tarkasti mitattua kuorma-auton akselimassa, mutta dynaamisessa tilanteessa eli auton liikkuessa syntyy akselille hitausvoimia. Tätä varten akselille on asennettu kiihtyvyyssanturi (kuva 5), jolla voidaan ottaa huomioon pyörän pystysuuntainen hitausvoima. Mittauksissa näytteenottotaajuutena oli 300 Hz, jolloin dynaaminen akselipaino voitiin todeta noin 8 cm:n välein ajonopeudella 80 km/h.



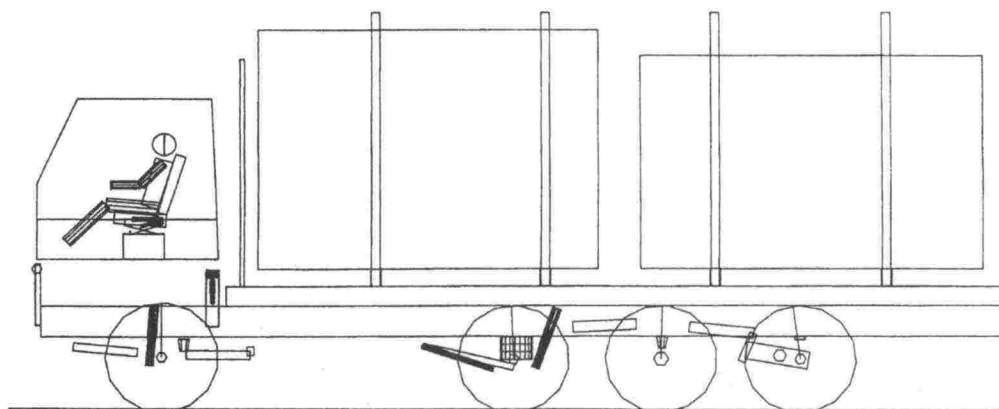
Kuva 5: Periaatekuva antureista kuorma-auton akseleilla dynaamisessa akselipainomittauksessa.

Pyörän tiehen kohdistamien voimien erottelemiseksi suodatettiin signaalia 100 Hz:n analogisella ja 50 Hz:n digitaalisella alipäästösuodattimella. Sen lisäksi tien kaarteisuuden ja tuulikuorman aiheuttamat korin kallistelusta johtuvat erittäin pitkät aallonpituudet poistettiin 2 sekunnin liukuvalla keskiarvolla.

4.3 ADAMS-simulointi

ADAMS-ohjelmistolla tehdyt simuloinnit perustuvat alunperin kuorma-auton ajomukavuuden tutkimista varten mallinnettuun kolmiulotteiseen neliakseliseen kuorma-automalliin. Kuorma-auton ajomukavuuden kehittämisessä ko. malli on osoittautunut hyödylliseksi, ja tehdyt simuloinnit ovat vastanneet erittäin hyvin mittauksia. Aiemmin ko. simulointimallia on käytetty myös tutkimukseen, miten dynaamiset akselipainot kohdistuvat tiettyihin paikkoihin /7,8/. Nämä tutkimukset ovat antaneet selviä viitteitä siitä, että eri kuorma-autojen dynaamiset akselipainot eivät jakaudu tasaisesti koko tieprofiilille. On havaittu, että tietyt tien epätasaisuudet rikkovat kuorma-auton ominaistajuuksien mukaiset dynaamiset akselipainot, pakottaen ne samoihin kohtiin tiellä eri kuorma-autoilla. Tutkittua tietoa näiden epätasaisuuksien täsmällisestä muodosta ei toistaiseksi ole.

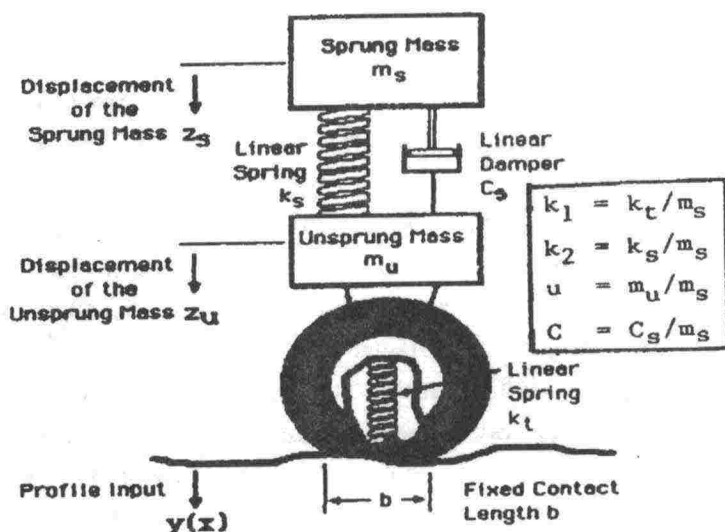
ADAMS-malli ottaa huomioon rungon joustavuutta lukuunottamatta kaikki dynaamisiin akselipainoihin vaikuttavat tekijät. Tämäkin olisi mahdollista sisällyttää malliin, mutta parametrien saatavuus on toistaiseksi estänyt rungon joustavuuden mallintamisen. Kuvassa 6 on ADAMSin "rautalankamalli" neliakselisesta kuorma-autosta, jossa on ilmajousi toisella akselilla ja teräsjouset muilla akseleilla.



Kuva 6: ADAMS-malli neliakselisesta kuorma-autosta.

4.4 QCS-simulointi

PTM-autossa IRI-arvon laskenta perustuu neljännesautomalliin (RQCS, Reference Quarter Car Simulation /11/). Mitattua tien profiilia pitkin kulkee simulointimalli (kuva 7), josta lasketaan yhteen korin ja pyörän välistä siirtymää kutakin sataa metriä kohti.



Kuva 7: Neljännesautomalli (RQCS /2/).

Kuvassa on esitetty tarvittavat parametrit, joita tutkimuksen yhteydessä säädettiin:

- Jousitettu massa m_s
- Jousittamaton massa m_u
- Jousen jäykkyys k_s
- Iskunvaimentimen jäykkyys c_s
- Renkaan jousivakio k_t

Neljännesautomalli on yksinkertaistettu malli todellisesta auton pyörän ja korin jousitusysteemistä. Mallin jouset ja vaimentimet ovat lineaarisia ja symmetrisiä sekä sisään- että ulosjouston suhteen, eivätkä ne ota huomioon esimerkiksi kitkan aiheuttamaa hystereesiä.

Muuttamalla mallin parametrit vastaamaan raskasta kalustoa ja laskemalla tien ja pyörän välistä puristumaa, saadaan dynaaminen akselipaino määritettyä, kun renkaan jousivakio tiedetään. Parametrien valinnalla voidaan suuresti vaikuttaa neljännesautomallin antamiin dynaamisiin akselipainoihin. Koska mallin jouset ja vaimentimet ovat yksinkertaistettuja, ei yksillä parametreilla pystytä simuloimaan aivan tarkasti eri tyyppisten epätasaisuuksien aiheuttamia dynaamisia akselipainoja. Parametrien valinnasta on kerrottu tarkemmin luvussa 5.4.

4.5 Dynaamisten akselipainojen vertailu

Kultakin koeosuudelta nopeudella 80 km/h (53_1, 53_2, 143 ja 170) mitatut sekä ADAMS:lla ja neljännesautomallilla simuloidut vetoakselin dynaamiset akselipainosignaalit on esitetty liitteissä 4 - 7 (ADAMS ylin, mitattu keskimmäinen ja QCS alin signaali).

Koeosuus 53_1 (liite 4) on pääsääntöisesti tasaista tietä (IRI = 0,96 - 2,40). Dynaamiset lisäkuormat vaihtelevat suurimmalta osin ± 20 %. Kohdilla 70, 120, 160 ja 430 metriä olevat yksittäiset epätasaisuudet (paikkauksia) erottuvat kaikilla kolmella menetelmällä hyvin saman kaltaisina. Myös kohdalla 230 m oleva ajoneuvovaaka (WIM) erottuu selvästi.

Liitteessä 5 oleva koeosuus 53_2 on vertailuaineiston tasaisin (IRI = 0,83 - 1,35). Sekä ADAMS- että QCS-mallin dynaamiset lisäkuormat ovat säännönmukaisesti alle ± 10 %. 400 metrin kohdalla oleva paikattu poikittaishalkeama aiheuttaa hieman suurempia dynaamisia lisäkuormia. Mitattu dynaaminen akselipaino vaihtelee enemmän ja on suurempitaajuisia. Tasaisella tiellä lehtijousten lehtien välisestä lepokitkasta aiheutuva jousen kovuus pienillä joustoliikkeillä tulee selvästi esiin.

Koeosuus 143 (liite 6) on vertailuaineiston huonoin (IRI = 6,17 välillä 200 - 300 metriä). Kohdilla 55, 130, 260, 320 ja 440 metriä olevat dynaamiset lisäkuormat löytyvät kaikista kolmesta akselipainosignaalista. Mittauskuorma-auton erilainen telin geometria (teliväli 1,20 metriä, ADAMS-mallilla 1,35 metriä) sekä telin keinuntaa estävä vaimennuksen puuttuminen ilmenee selvästi kohdilla 130 ja 320 metriä. Mittauskuorma-auton telin keinunta näkyy selvästi korkeampitaajuisena dynaamisen lisäkuorman vaihteluna. Neljännesautomalli (QCS) ei pysty simuloimaan tällaista tilannetta.

Koeosuudella 170 (liite 7, IRI = 1,58 - 4,44) on kohdalla 240 metriä hyvin selvä yksittäisepätasaisuus. Varsinkin mittauskuorma-auto reagoi siihen hyvin voimakkaasti, sekä auton runko että teli keinuvat selvästi. Simulointimallien parempi jousitus ottaa epätasaisuuden pehmeämmin. Dynaamiset lisäkuormat nousevat niilläkin + 40 prosenttiin.

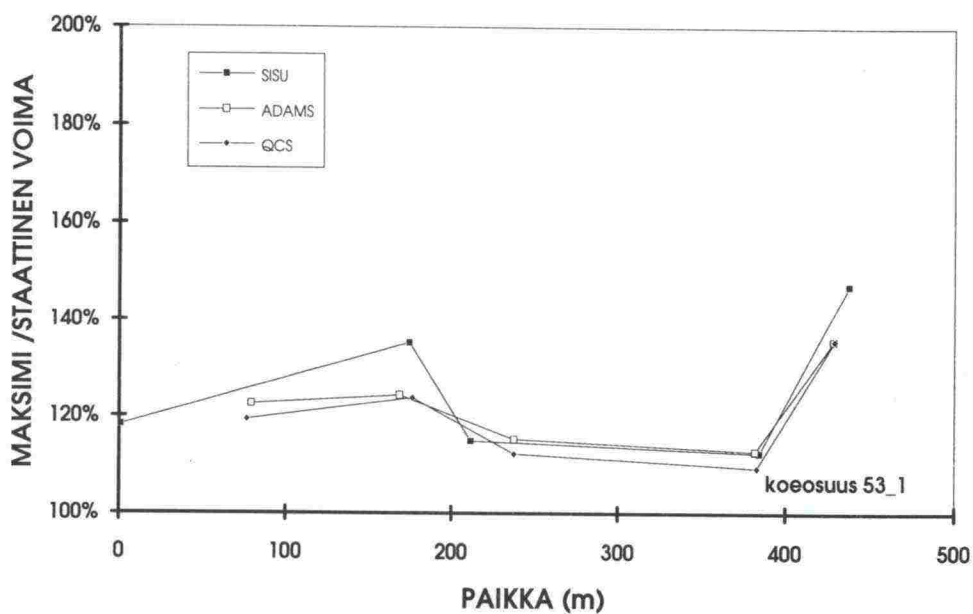
Koeosuuksien yksittäiset maksimit ja niiden paikka kultakin koeosuuden sadalta metriltä on esitetty kuvissa 8 - 11 sekä liitteen 8 taulukoissa kilonewtoneina ja prosentteina staattisesta akselipainosta.

Koeosuuden 53_1 satojen metrin maksimit (kuva 8) ovat kaikkien menetelmien osalta hyvin samantasoisia ja esiintyvät varsinkin simulointimalleilla samoilla kohdilla.

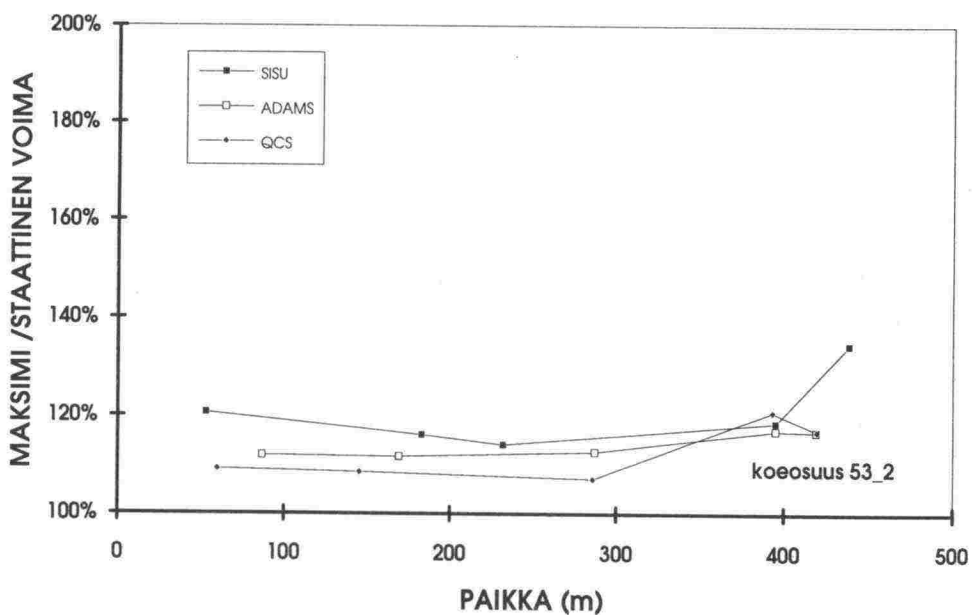
Koeosuus 53_2 (kuva 9) on niin tasainen, että dynaamisiin akselipainoihin ei synny tien profiilista aiheutuvaa samaan kohtaan keskittymistä. Poikkeuksen tekee 400 metrin molemmin puolin olevat epätasaisuudet. Näin tasaisella tiellä dynaaminen akselipaino vaihtelee kuorma-auton rungon (noin 2 Hz) ja akselien (noin 10 Hz) ominaistajuuksien mukaisesti.

Koeosuudella 143 (kuva 10) olevat dynaamisen akselipainon maksimit ovat edelleen hyvin samantasoisia väliä 100 - 200 metriä lukuun ottamatta. Koeosuuden oikealla pyöräuralla oli tierakenteen pettämisen takia selviä painumia, joten vasemman pyöräuran profiili on erilainen. Tällä hetkellä PTM-auto ei pysty mittaamaan kuin oikean pyöräuran profiiliin (tulevaisuudessa mahdollisesti myös vasen pyöräura mitataan). Vasemman pyöräuran profiilitiedon puuttumisen takia ADAMS-malli käyttää samaa tien profiilia molemmilla pyöräurilla. Mainittu ero saa aikaan eroja myös dynaamisiin akselipainoihin.

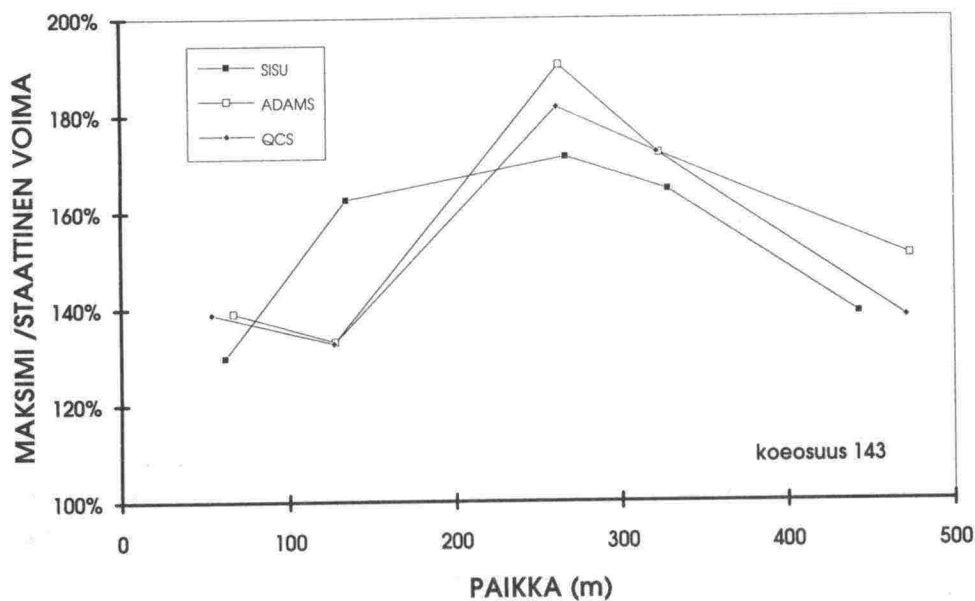
Koeosuuden 170 maksimiarvot (kuva 11) osoittavat ADAMS- ja QCS-mallien toimivan keskenään samankaltaisesti. Erilaisen akseligeometrian ja huonomman jousituksen seurauksena mittauskuorma-auton maksimiarvo kohdalla 230 metriä on noin 20 %-yksikköä suurempi.



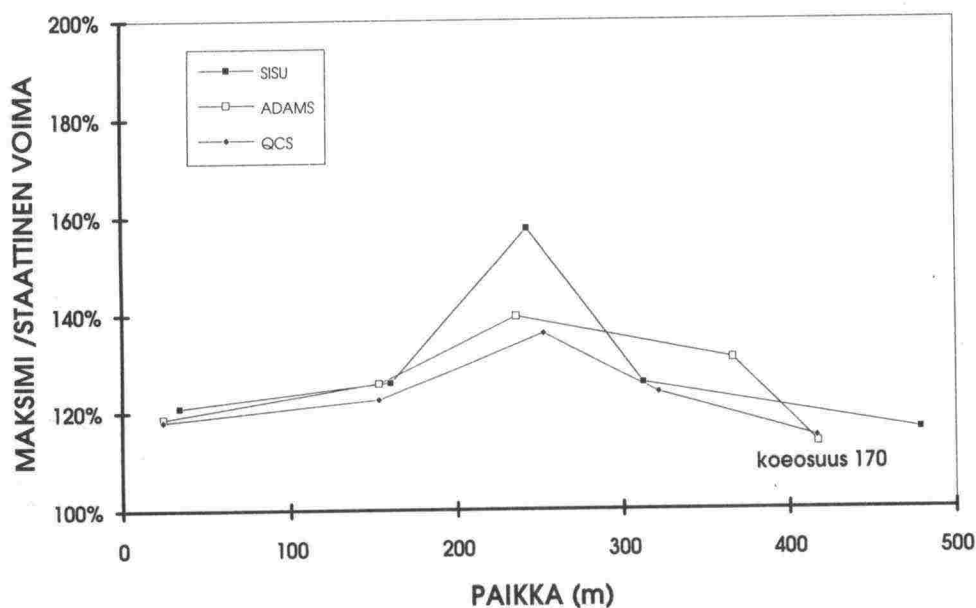
Kuva 8: Koeosuuden 53_1 dynaamiset akselipainot (mitattu, ADAMS ja neljännesautomalli).



Kuva 9: Koeosuuden 53_2 dynaamiset akselipainot (mitattu, ADAMS ja neljännesautomalli).



Kuva 10: Koeosuuden 143 dynaamiset akselipainot (mitattu, ADAMS ja neljännesautomalli).



Kuva 11: Koeosuuden 170 dynaamiset akselipainot (mitattu, ADAMS ja neljännesautomalli).

5 INDEKSIMALLIT

5.1 Yleistä

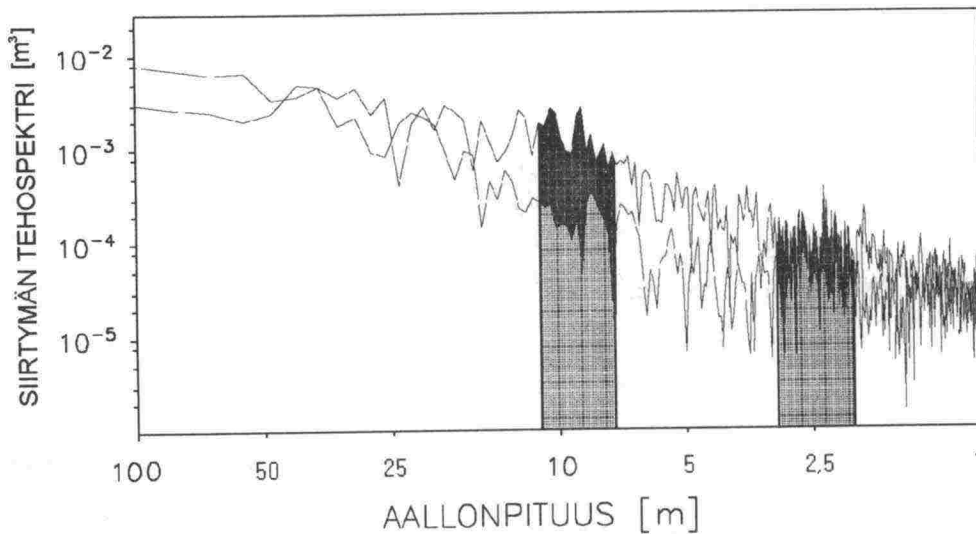
Dynaamisen rasitusindeksin lähtökohtana on mitata tien profiili, josta laskennallisesti määritetään indeksi. Indeksia voidaan määrittää suoraan profiilin muodosta esim. spektrianalyysin avulla. Toinen tapa on simuloida mitatulla tien profiililla dynaamisia akselipainoja ja muodostaa niistä indeksi.

5.2 Tien profiiliin perustuva indeksimalli

Laskettaessa rasitusindeksi suoraan tien profiilista voidaan käyttää esim. spektrianalyysiä. Tällöin saadaan selville erilaisten aallonpituuksien määrä tarkasteltavalta tieltä. Koska kuorma-auton akselilla ja rungolla on tietyt ominaistaajuutensa (akselilla noin 10 Hz, rungolla noin 2 Hz), vaikuttavat näitä taajuuksia vastaavat tien profiilin aallonpituudet dynaamisia lisäkuormia lisäävästi. Kun oletetaan kuorma-autolle jokin tietty nopeus, saadaan vastaavat aallonpituudet laskettua. Esimerkiksi nopeudella 80 km/h 2 Hz vastaa 11 metriä ja 10 Hz 2,2 metriä.

Kuvassa 12 ovat koeosuuksien 53_2 (tasaisin) ja 143 (epätasaisin) tehospektrit. Tehospektri kuvaa signaalin (tien profiilin) tehon jakautumista taajuustasossa (aallonpituustasossa). Kuvassa on esimerkki, jossa 2 - 3 Hz:ä ja 7,5 - 11 Hz:ä vastaavien aallonpituuskaistojen (harmaat alueet) yhteenlaskettu pinta-ala muodostaa dynaamisen rasitusindeksin. Koeosuuden 53_2 eri aallonpituuksien amplitudit eri aallonpituuksilla ovat pienemmät, jolloin myös pinta-ala (vaaleampi alue) on pienempi kuin koeosuuden 143 pinta-ala (vaalea ja tumma alue yhteenlaskettuna).

Tätä menetelmää ei toistaiseksi voida käyttää PTM-autossa, sillä laskennasta huolehtiva prosessorikortti ei pysty laskemaan reaaliajassa tien profiilista tehospektriä. Menetelmä vaatii lisää tutkimista siinä vaiheessa, kun siirrytään tehokkaampiin prosessoreihin PTM-autoissa.

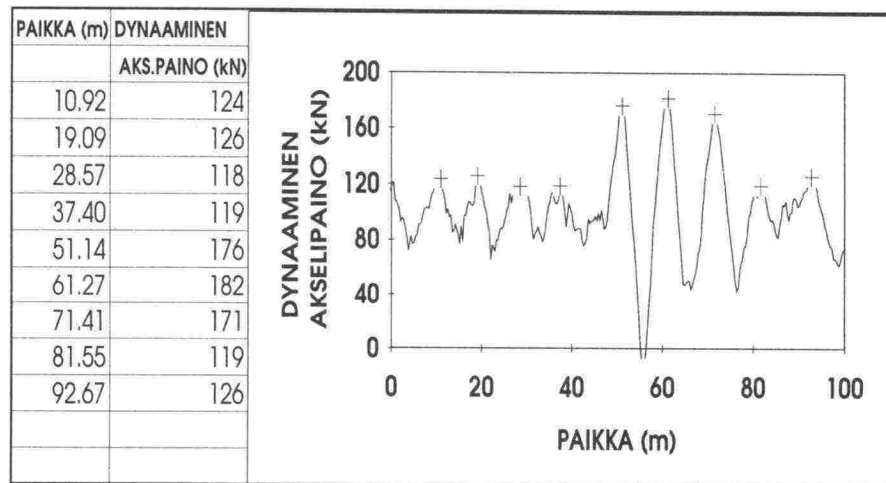


Kuva 12: Profiilien tehospektreistä lasketut DRI:t. Vaalea pinta koeosuuden 53_2 DRI. Vaalea ja tumma pinta yhteensä koeosuuden 143 DRI.

5.3 Dynaamisesta akselipainosta laskettu indeksi

Tien profiilin lisäksi indeksin laskennan perustana voi olla itse tietä rasittava ilmiö, tiellä liikkuvan raskaan ajoneuvon aiheuttama dynaaminen akselipaino. Neljännesautomallista laskettava dynaaminen akselipaino valittiin dynaamisen rasitusindeksin pohjaksi, sillä PTM-auton nykyinen prosessorikortti pystyy suorittamaan tarvittavan laskennan mittauksen yhteydessä.

Tutkimuksessa oli mukana kolme dynaamisen akselipainon simulointiin perustuvaa indeksin laskennan periaatetta. Merkitsevien yksittäismaksimien laskentaan perustuvassa menetelmässä dynaamisesta akselipainosta otetaan huomioon kaikki yksittäiset maksimiarvot (kuva 13), jolloin voidaan eritellä mahdollisesti yhdestä suuresta epätasaisuudesta tai monesta pienestä epätasaisuudesta aiheutuvat dynaamiset lisäkuormat. Yksittäisten maksimien haku vaatii niin suurta laskentakapasiteettia, ettei PTM-auton nykyinen prosessorikortti siitä suoriudu. Niinpä päähuomio tutkimuksessa kiinnitettiin kahteen seuraavaan indeksimalliin. Dynaamisesta akselipainosta laskettavaan tehollisarvoon (RMS) ja neljännen potenssin sääntöön perustuvaan malliin.



Kuva 13: Yksittäismaksimi-arvot dynaamisessa akselipainosignaalin.

5.3.1 Tehollisarvo (RMS) menetelmä

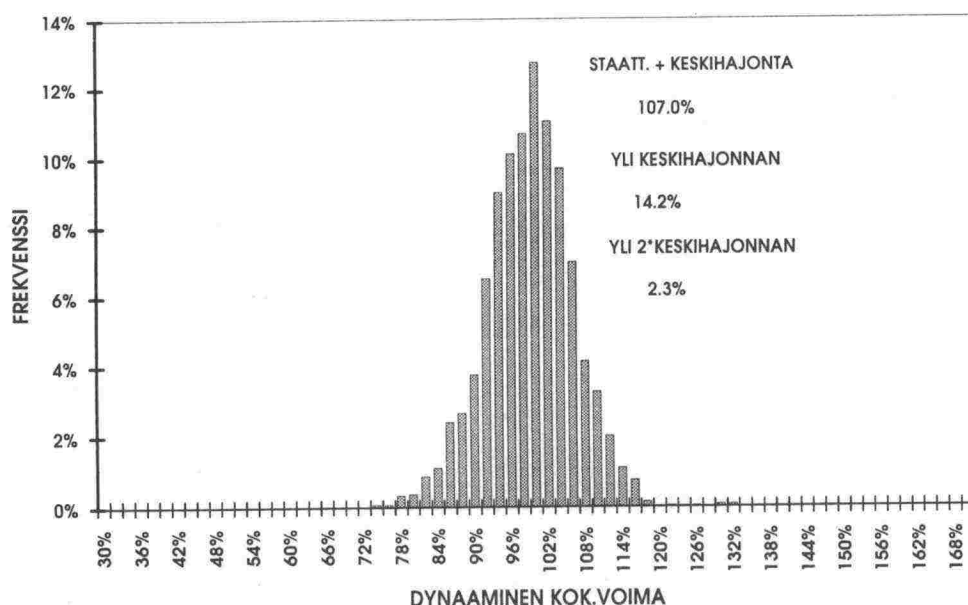
Dynaamisen akselipainosignaalin tehollisarvo (RMS = Root Mean Square) kuvaa keskimääräistä dynaamisen lisäkuorman arvoa. Tehollisarvo on likimain yhtä kuin keskihajonta. Tässä menetelmässä tehollisarvon ja staattisen akselipainon summaa käytetään indeksinä. RMS-menetelmällä lasketun DRI:n yksikkö on kN. Menetelmän laskenta-algoritmi on esitetty kaavassa 2.

$$DRI_{rms} = F_S + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (F_{D_i} - F_S)^2}{N}} \quad (2)$$

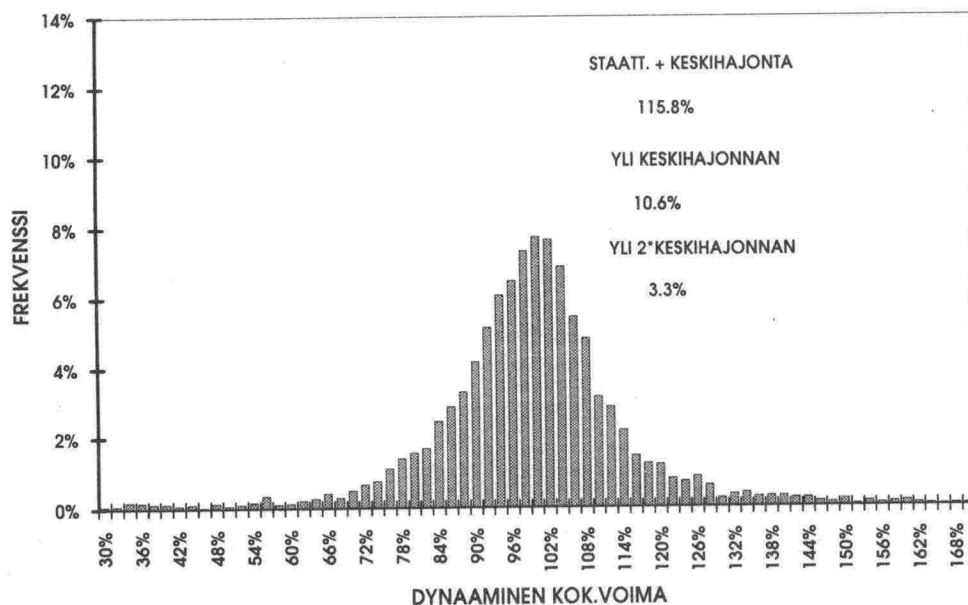
jossa N = havaintojen lukumäärä 100 metrillä
 F_D = dynaaminen akselipaino
 F_S = staattinen akselipaino

Mikäli dynaaminen akselipaino on normaalisti jakautunut, voidaan olettaa dynaamisen lisäkuorman jakaumasta noin 16 % ylittävän lasketun RMS-arvon. Kuvassa 14 on esimerkki kuorma-auton vetoakselilta mitatun dynaamisen akselipainon jakaumasta koeosuudelta 53_2 (tasaisin koeosuus) ja kuvassa 15 koeosuudelta 143 (epätasaisin koeosuus). Tasaisella tiellä dynaaminen lisäkuorma vaihtelee noin ± 20 % rajoissa tehollisarvon ollessa 7 %. Erittäin

huonokuntoisella tiellä (koeosuus 143) lisäkuorman vaihtelu on jo $\pm 70\%$ ja tehollisarvo on noin 16% . Dynaamisen akselipainon jakauma on selvästi laakeampi kuin tasaisella tiellä.



Kuva 14: Vetoakselilta mitatun dynaamisen akselipainon jakauma (koeosuus 53_2).



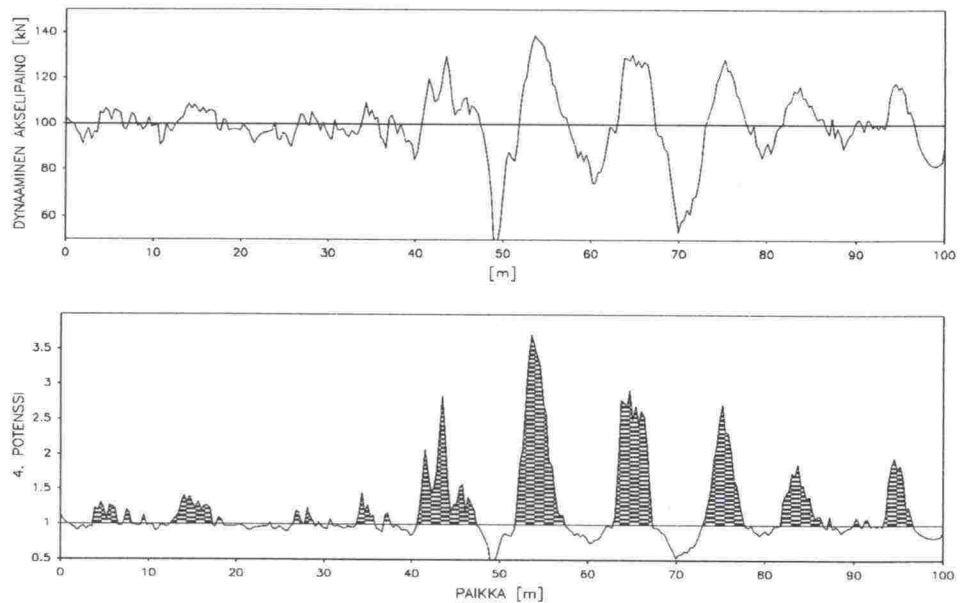
Kuva 15: Vetoakselilta mitatun dynaamisen akselipainon jakauma (koeosuus 143).

5.3.2 Neljännen potenssin menetelmä

Neljännen potenssin menetelmässä käytetään hyväksi QCS-mallista simuloimalla saatua dynaamista akselipainoa. Kuvan 16 esimerkissä on esitetty dynaaminen akselipaino (ylempi signaali), vaakaviiva kuvaa staattista akselipainoa. Neljännen potenssin menetelmällä muodostuneen pinnan ala 100 metriä kohden vastaa dynaamista rasitusindeksiä graafisesti esitettynä (varjostettu alue, alempi kuva). Täysin tasaisen tien rasitusindeksiksi muodostuu arvo 100. Tässä menetelmässä DRI on dimensioton luku. Laskenta-algoritmi on esitetty kaavassa 3.

$$DRI_{4.potenssi} = \frac{100}{N'} \sum_{i=1}^{N'} \left(\frac{F_{D_i}}{F_S} \right)^4, \quad (3)$$

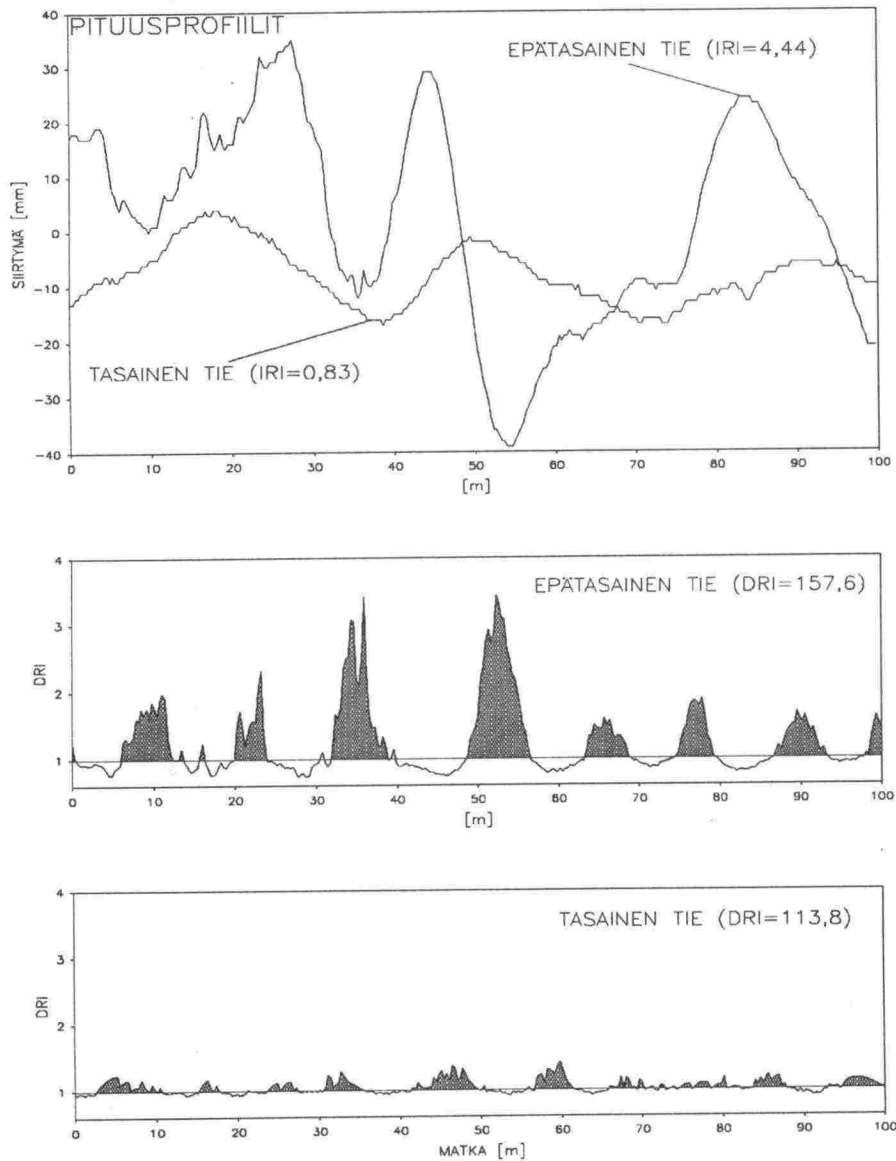
jossa Summaus tehdään niiden havaintojen osalta (lukumäärä N'), joille $F_D > F_S$
 F_D = dynaaminen akselipaino
 F_S = staattinen akselipaino



Kuva 16: Dynaaminen akselipaino ja 4. potenssin säännöllä laskettu dynaaminen rasitusindeksi graafisesti esitettynä. Vaakaviiva kuvaa staattista akselipainoa.

Kuvasta 16 nähdään, kuinka neljännen potenssin ansiosta suuret dynaamiset akselipainot korostuvat esimerkiksi kohdalla 52 - 57 metriä. Kuvassa 17 on esimerkki hyvän ja huonon tien dynaamisesta rasitusindeksistä neljännen

potenssin menetelmällä laskettuna. Ylimpänä on teiden pituusprofiilit. Keskimmaisesta kuvasta erottuvat selvästi pituusprofiilissa olevien kuoppien kohdalle syntyvät rasitusvaikutukset (kohdat 35 ja 55 m). Tasaisella tiellä kuorma-auton aiheuttama lisärasitus on hyvin vähäistä (alin kuva).



Kuva 17: Tasaisen ja epätasaisen tien pituusprofiilit (tasaisuuden pysyvuuntaiset muutokset) ja dynaamiset rasitusindeksit (varjostetun pinnan ala).

5.4 Mallin valinta

Dynaamisen rasitusindeksin kehittämisessä tärkeimmäksi kriteeriksi asetettiin kuorma-autojen aiheuttamien tien rakenteelle vaarallisten rasitusten osoittaminen. Käytössä olevan IRI-arvon on aikaisemmissa tutkimuksissa todettu olevan riittämätön indeksi vastaamaan edellä mainittuun kysymykseen /10/. Rasitusvaikutuksiltaan hyvin erilaisilta tien profiileilta on saatu sama IRI-arvo. Jatkuvilla pienillä epätasaisuuksilla on ollut sama vaikutus kuin yhdellä isolla epätasaisuudella.

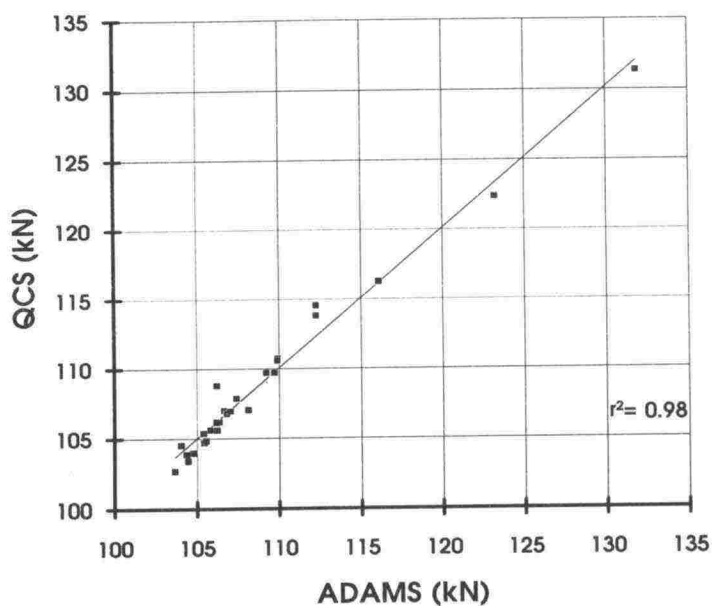
5.4.1 Parametrien valinta

Raskaan kaluston akselistotyyppien selvityksen perusteella valittiin paraabelijousituksella ja paripyörillä varustettu 10 tonnin akseli vertailukohdaksi. ADAMS-simulointimallin vetoakselin todettiin parhaiten kuvaavan valittua vertailukohdetta. Valitulla ADAMS-simulointimallilla laskettiin kullekin 27:lle 100 metrin tien profiilille dynaamiset akselipainot. Niistä laskettiin edelleen dynaamiset rasitusindeksit, joita käytettiin vertailulukuina neljännesautomallista laskettaville rasitusindekseille.

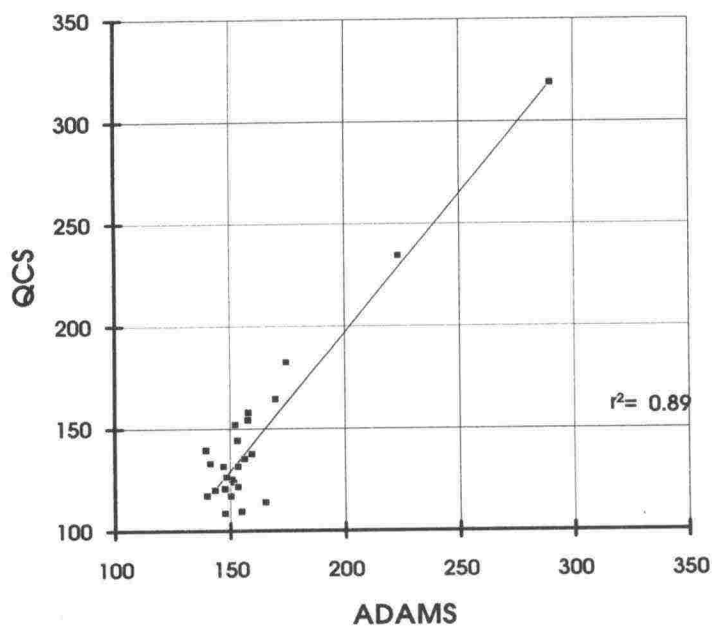
Aiemmin mainitun parametriselvityksen pohjalta neljännesautomallin parametreja säädettiin, kunnes saavutettiin ADAMS-mallia mahdollisimman hyvin toteuttava neljännesautomalli. Parametrien valinnassa käytettiin yli 10 000 erilaista parametriyhdistelmää. Esimerkiksi vaimentimen arvoina käytettiin 5000 - 60000 Ns/m ja jousen arvoina 150 - 1400 N/mm.

RMS-menetelmällä laskettujen rasitusindeksien (ADAMS vs QCS) korrelaatio on esitetty kuvassa 18. Tällä menetelmällä rasitusindeksiä laskettaessa saadaan neljännesautomalli toimimaan erittäin hyvin monimutkaisemman ADAMS-mallin kanssa (selitysaste $r^2 = 0,98$).

Myös neljännen potenssin menetelmälle saatiin neljännesautomallin parametrit säädettyä vastaamaan riittävän hyvin ADAMS-mallia (selitysaste $r^2 = 0,89$). Tämä menetelmä on herkempi yksittäisille poikkeavuuksille eri mallien dynaamisissa akselipainosignaaleissa, mikä selittää alhaisemman korrelaation. Kuvassa 19 on esitetty neljännen potenssin menetelmällä ADAMS-mallin ja neljännesautomallin korrelaatio.



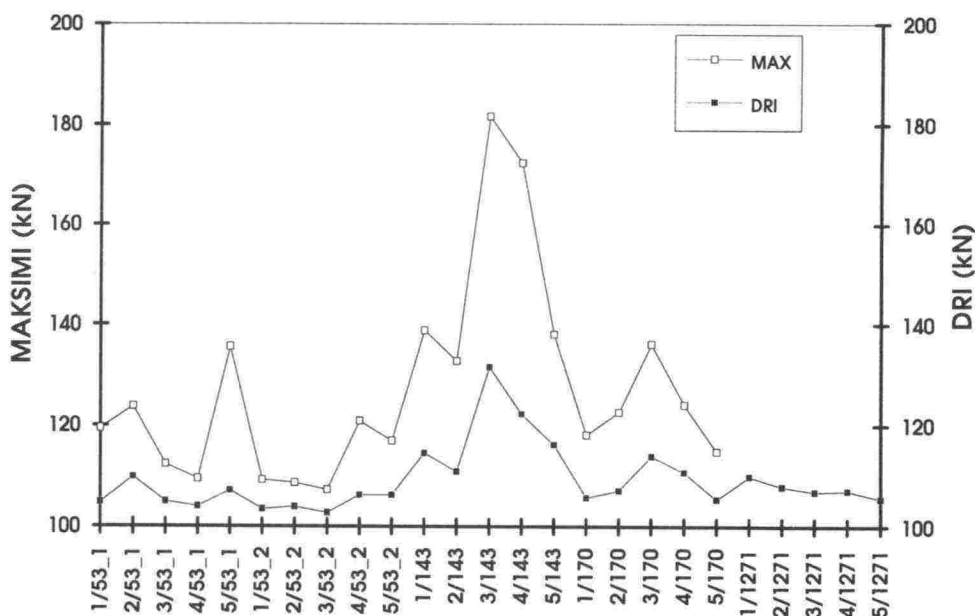
Kuva 18: ADAMS- ja neljännesautomallin korrelaatio RMS-menetelmällä.



Kuva 19: ADAMS- ja neljännesautomallin korrelaatio neljännen potenssin menetelmällä.

5.4.2 Menetelmän valinta

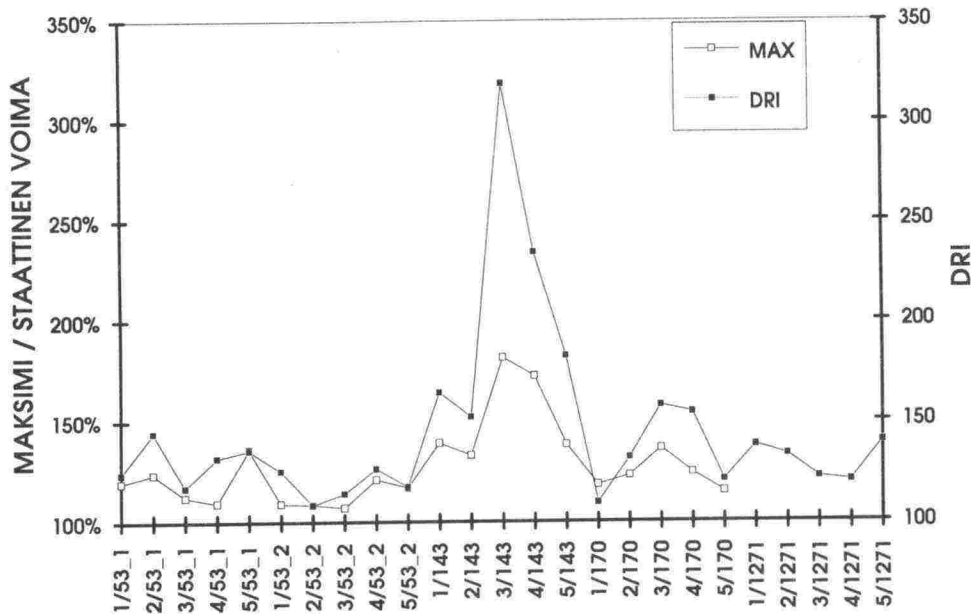
PTM-auton prosessorikortin laskentakapasiteetti rajasi toistaiseksi rasitusindeksin laskennan perustaksi neljännesautomallin dynaamisesta akselipainosta laskettavan indeksin. Vaihtoehtoina olivat edellä kuvatut RMS-menetelmä ja neljännen potenssin menetelmä. Kummallakin menetelmällä vertailuaineistona käytettiin aikaisemmista tutkimuksista saatuja tien profiileja /7,8,10/. Vertailuaineisto käsitti 27 hyvin erilaista 100 metrin profiilia, joiden IRI-arvot vaihtelivat 0,83 - 6,17 välillä. Suurin huomio kiinnitettiin huonojen teiden antamiin tuloksiin. Kuvassa 20 on esitetty RMS-menetelmällä lasketun rasitusindeksin ja kunkin koeosuuden maksimi-arvot.



Kuva 20: Dynaamisen akselipainon maksimi-arvot ja DRI-arvo (RMS-menetelmä) vertailukoeosuuksilla.

Kuvasta 20 nähdään, että RMS-menetelmällä laskettu DRI-arvo ei ota riittävästi huomioon tien kestojen kannalta usein kriittisiä yksittäisiä epätasaisuuksia esimerkiksi koeosuuksilla 5/53_1 ja 3/170. Arvot ovat kuitenkin johdonmukaisia yksittäisiin maksimi-arvoihin verrattuna.

Kuvassa 21 on vastaava tarkastelu neljännen potenssin menetelmällä. Siitä havaitaan, että suuret epätasaisuudet korostuvat erittäin voimakkaasti esimerkiksi koeosuudella 3/143. Vaihteluvälin laajuuden ansiosta myös yksittäisepätasaisuudet tulevat paremmin esiin kuin RMS-menetelmällä.



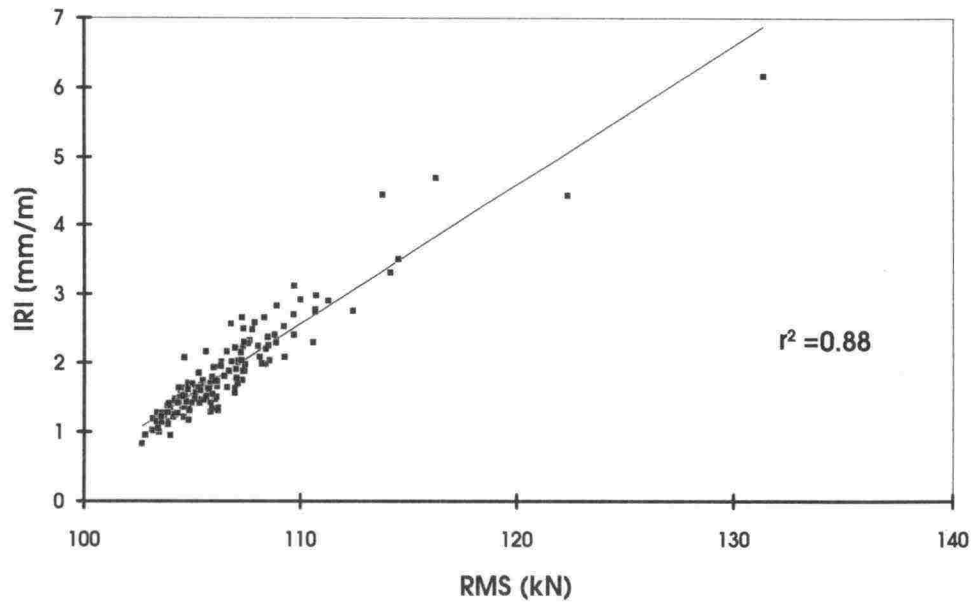
Kuva 21: Dynaamisen akselipainon maksimiarvot ja DRI-arvo (neljännen potenssin menetelmä) vertailukoeosuuksilla.

IRI-arvoon vertailua varten otettiin SHRP-tutkimuksesta lisää tien profiileja, joille laskettiin IRI ja dynaaminen rasitusindeksi sekä RMS-menetelmällä että neljännen potenssin menetelmällä. Yhteensä profiileja oli käytettävissä vertailuun 161 kpl. IRI:n ja RMS-menetelmällä lasketun DRI:n korrelaatio on esitetty kuvassa 22. Selitysaste ($r^2 = 0.88$) on varsin korkea, mutta samalla DRI-arvolla IRI voi vaihdella merkittävästi esimerkiksi DRI:n ollessa 110 kN IRI vaihtelee välillä 2,0 - 3,2 mm/m.

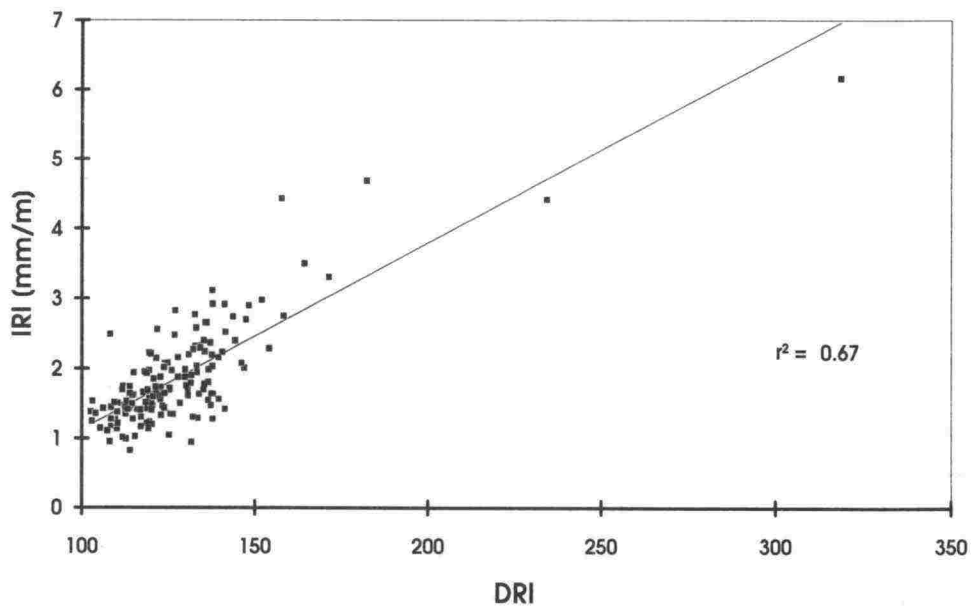
Neljännen potenssin menetelmällä laskettaessa korrelaatio on selvästi pienempi (selitysaste $r^2 = 0,67$). Tällä menetelmällä suuret dynaamiset akselipainot korostuvat, mikä näkyy epälineaarisena IRI:n ja DRI:n yhteytenä. Kuvassa 23 on esitetty IRI:n ja rasitusindeksin korrelaatio. Regressiosuoraan vaikuttaa voimakkaasti pisteet kohdilla DRI = 240 ja 320. Ne viittavat siihen, että DRI:n ja IRI:n välillä on epälineaarinen yhteys.

Molemmilla menetelmillä voidaan erotella IRI:ä paremmin raskaan kaluston tierakenteelle aiheuttamia rasitusvaikutuksia. Menetelmien antamat DRI-arvot sekä IRI:t kaikilta 161:ltä koeosuudelta on esitetty liitteissä 9 ja 10. RMS-menetelmässä rasitusindeksin vaihteluväli on melko suppea. Käytettävissä olleella profiiliaineistolla DRI vaihteli noin 103 - 131 kN:n välillä. Neljännen potenssin menetelmällä vaihteluväli oli selvästi laajempi, ollen noin 103 - 319. Neljännen potenssin menetelmällä saadaan paremmin otetuksi huomioon yksittäiset epätasaisuudet ja myös selvästi eroteltua huonot osuudet tiestä. Nykyisen tien rasitusteorian mukaan tierakenteen rasitus kasvaa akselipainon

muutoksen neljännessä potenssissa. Näillä perusteilla päätettiin DRI:n laskentamenetelmäksi valita neljännessä potenssin menetelmä.



Kuva 22: RMS-menetelmällä DRI:n ja IRI:n riippuvuus koeosuuksilla (161 kpl).



Kuva 23: Neljännessä potenssin menetelmällä DRI:n ja IRI:n riippuvuus koeosuuksilla (161 kpl).

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

Tutkimuksessa onnistuttiin kehittämään dynaamisista akselipainoista tielle aiheutuvaa lisärasitusta kuvaava indeksimalli. Neljännesautomallilla (QCS) simuloitu dynaaminen akselipaino soveltuu hyvin dynaamisen rasitusindeksin laskennan perustaksi. Mallin parametrien valinnassa on kiinnitetty erityisesti huomiota huonojen teiden aiheuttamiin dynaamisiin rasituksiin.

Neljännespotenssin menetelmään perustuva dynaaminen rasitusindeksi erottelee IRI:ä paremmin erilaisista epätasaisuuksista aiheutuvat tien rasitukset.

Neljännespotenssin menetelmä kuvaa RMS-menetelmää paremmin tien epätasaisuudesta tielle syntyvät rasitukset. Projekti ehdottaa, että dynaaminen rasitusindeksi (DRI) kuvataan kaavassa 3 esitetyllä ns. neljännespotenssin menetelmään perustuvalla tavalla. Toisena tunnuslukuna rekisteröidään dynaamisen akselipainon maksimiarvo ja sen paikka jokaiselle 100 metrin jaksolle. Tunnusluvut DRI ja maksimiarvo suositellaan otettaviksi käyttöön tieverkon ylläpidon suunnittelussa.

Eri kuorma-autot käyttäytyvät jousitusgeometriastaan yms. johtuen yksittäisepätasaisuuksissa eri tavoin. Dynaamiset akselipainot kohdistuvat usein myös eri kuorma-autoilla tiettyihin kohtiin tiellä. Suurien akselipainojen keskittyminen lyhentää tierakenteen kestoikää. Mikäli PTM-auton prosessorikortti vaihdetaan myöhemmän kehitystyön yhteydessä tehokkaampaan on mahdollista vaihtaa rasitusindeksin laskenta kaikki merkittävät yksittäiset epätasaisuudet huomioon ottavaksi. Tämä lisätieto antaa tarkemman kuvan rasitusten ja kestoiän kannalta kriittisten kohtien jakautumisesta tiellä.

Koska vertailuaineisto osoittautui huonojen teiden osalta ($IRI > 3,0$) varsin suppeaksi, käsittäen koeosuudet 143 ja 170, jatkotutkimuksissa on tärkeitä löytää eri tavoin huonolaatuisia koeosuuksia vertailuaineistoksi. Koeosuuksien valinnassa tulee ottaa erityisesti huomioon suuret yksittäisepätasaisuudet. Lisäaineiston avulla neljännesautomallin luotettavuutta voidaan parantaa ja parametreja tarvittaessa korjata.

Neljännesautomallilla on mahdollista tehdä vertailuajoja erilaisilla parametreilla, jolloin saadaan selville, kuinka suuria eroja eri automallien välille syntyy.

Tässä tutkimuksessa ei käsitelty dynaamisesta akselipainosta aiheutuvia tien kestoiän muutoksia. Niiden selvittäminen edellyttää jatkotutkimuksia. Jatkotutkimusten on syytä sisältää useampivuotisen seurannan DRI:n muuttumisesta ja tien vaurioitumisen kehittymisestä.

7 KIRJALLISUUSLUETTELO

1. Tieliikenteen tavarankuljetustilasto 1991. Tielaitoksen tilastoja 4/1992. Tiehallitus, Helsinki 1992.
2. The AASHO Road Test, Highway Research Board, Special Report 61. Washington D.C. 1962.
3. Spoof, H., Asfaltin väsyminen. ASTO/TR4 tutkimusraportti 74. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio. Espoo 1992.
4. Heavy trucks, climate and pavement damage. Paris 1988, Organisation for Economic Cooperation and Development, OECD, Road Transport Research. 172 s.
5. Huhtala, M., Kurki, T., Orama, R., Pihlajamäki, J. & Ruotoistenmäki, A., Väsymissuorat tierakenteen mitoitusta varten. Tielaitoksen selvityksiä 47/1993. Tielaitos/Geokeskus & VTT/TGL. 1993. 48 s. + liit. 30 s.
6. OECD Full Scale Pavement Test. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). Road Transport Research. Scientific Expert Group I4. Paris 1991. 266 p.
7. Huhtala, M., Halonen, P. & Pihlajamäki, J., Spatial Distribution of Dynamic Loadings on Pavements. Preprint 931062. TRB Annual Meeting 1993. Washington D.C.
8. Huhtala, M., Pihlajamäki, J. & Halonen, P., WIM and dynamic loading of pavements. Heavy vehicles and roads. Proceedings of the third international symposium on heavy vehicle weights and dimensions. Cambridge, UK June 28 - July 2, 1992.
9. Dynamic loading of pavements. Organisation for Economic Co-operation and Development OECD. Paris 1992. 184 s.

10. Halonen, P., Laitinen, V. Teiden tasaisuusmittareiden vertailu. PTM:n, Roadmanin ja Dipstickin laitevertailu sekä epätasaisuuksien vaikutus tierasitukseen. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio. Tutkimusraportti 167. Espoo, toukokuu 1993.
11. Sayers, M., Gillespie, T., Quiroz, C. The International Road Roughness Experiment, Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements. The World Bank Technical Paper Number 45. Washington D.C., USA 1986.

8 LIITTEET

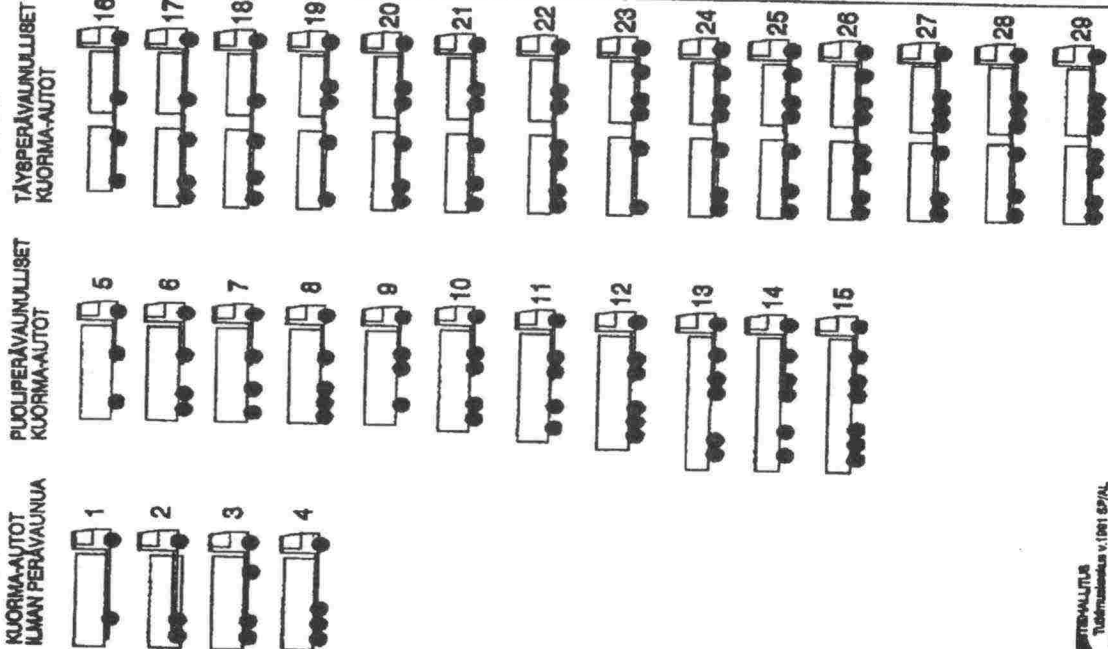
- LIITE 1. Ote Tielaitoksen tilastosta 4/1992 (Tieliikenteen tavarankuljetustilasto 1991) /6/.
- LIITE 2. Kuorma-autotyyppien jakautuminen tutkimuksen yhteydessä tehdyssä otannassa.
- LIITE 3. Epätasaisuuden luokittelu ja vaikutus tien palvelutasoon.
- LIITE 4. Dynaamiset akselipainot koeosuudella 53_1: ADAMS-simulointi, mitattu (Sisu) ja QCS-simulointi.
- LIITE 5. Dynaamiset akselipainot koeosuudella 53_2: ADAMS-simulointi, mitattu (Sisu) ja QCS-simulointi.
- LIITE 6. Dynaamiset akselipainot koeosuudella 143: ADAMS-simulointi, mitattu (Sisu) ja QCS-simulointi.
- LIITE 7. Dynaamiset akselipainot koeosuudella 170: ADAMS-simulointi, mitattu (Sisu) ja QCS-simulointi.
- LIITE 8. Koeosuuksien 53_1, 53_2, 143 ja 170 dynaamisten akselipainojen maksimi-arvot ja niiden paikka yksittäisillä 100:lla metreillä: Mitattu (Sisu), ADAMS- ja QCS-simulointi.
- LIITE 9. SHRP-koeteiden IRI-arvot sekä DRI-arvot RMS- ja neljänneksen potenssin menetelmällä laskettuna.
- LIITE 10. SHRP-koeteiden IRI-arvot sekä DRI-arvot RMS- ja neljänneksen potenssin menetelmällä laskettuna, jatkoa.

Ote Tielaitoksen tilastosta 4/1992 (Tieliikenteen tavarankuljetustilasto 1991).

VUOSISUORITTEET 1991

KUORMA-AUTO- TYPPI	Puhuttu laito			Matko-			Liikenne-		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	16	90	0.0	0.4	3	0.03	3	0.03	
2	3282	21833	15.7	39.8	607	1.16	607	1.16	
3	1708	10964	21.2	134.3	363	1.81	363	1.81	
4	103	621	1.1	9.2	21	0.14	21	0.14	
5	122	687	2.2	19.4	33	0.26	33	0.26	
6	21	168	0.1	0.4	2	0.00	2	0.00	
7	33	254	0.2	2.0	10	0.08	10	0.08	
8	22	149	0.1	0.4	9	0.06	9	0.06	
9	34	205	0.1	1.0	21	0.15	21	0.15	
10	7	52	0.0	0.2	4	0.02	4	0.02	
11	34	409	0.3	3.1	16	0.18	16	0.18	
12	124	836	0.5	5.9	54	0.59	54	0.59	
13	135	860	0.5	6.6	55	0.78	55	0.78	
14	3	23	0.0	0.1	1	0.01	1	0.01	
15	4	25	0.0	0.3	2	0.03	2	0.03	
16	48	351	0.2	1.1	19	0.08	19	0.08	
17	33	222	0.1	1.0	19	0.14	19	0.14	
18	12	98	0.1	0.3	6	0.02	6	0.02	
19	244	2010	2.7	32.4	109	1.20	109	1.20	
20	399	2833	2.3	31.4	194	2.63	194	2.63	
21	247	1626	1.3	16.3	111	1.36	111	1.36	
22	616	3971	3.9	66.4	401	7.81	401	7.81	
23	48	380	0.5	8.9	32	0.55	32	0.55	
24	58	413	0.7	10.3	36	0.71	36	0.71	
25	37	271	0.3	5.3	26	0.40	26	0.40	
26	5	37	0.0	0.4	4	0.10	4	0.10	
27	165	1158	1.9	31.6	91	1.72	91	1.72	
28	140	986	1.5	26.3	84	1.70	84	1.70	
29	7	43	0.0	0.7	3	0.06	3	0.06	
YHTEENSÄ	7725	51574	57.6	453.4	2333	23.78	2333	23.78	

KUORMA-AUTOJEN TYYPPILOKITUUS



Kuorma-autotyyppien jakautuminen tutkimuksen yhteydessä tehdyssä otannassa.

KUORMA-AUTOT:

Akselistoprofiilit/Rengastus		Kuorma-autot	Puoliperävaunut	Täysperävaunut	Yhteensä
Etuakselit	Taka-akselit				
①	②	49	23	9	81
①	① ②	5	12	1	18
①	② ①	2	5	18	25
①	② ②	44	35	106	185
① ①	② ①	1	-	1	1
① ①	② ②	1	-	6	7
①	① ② ①	-	-	1	1
①	① ② ②	12	-	21	33
Yhteensä		114	75	162	351

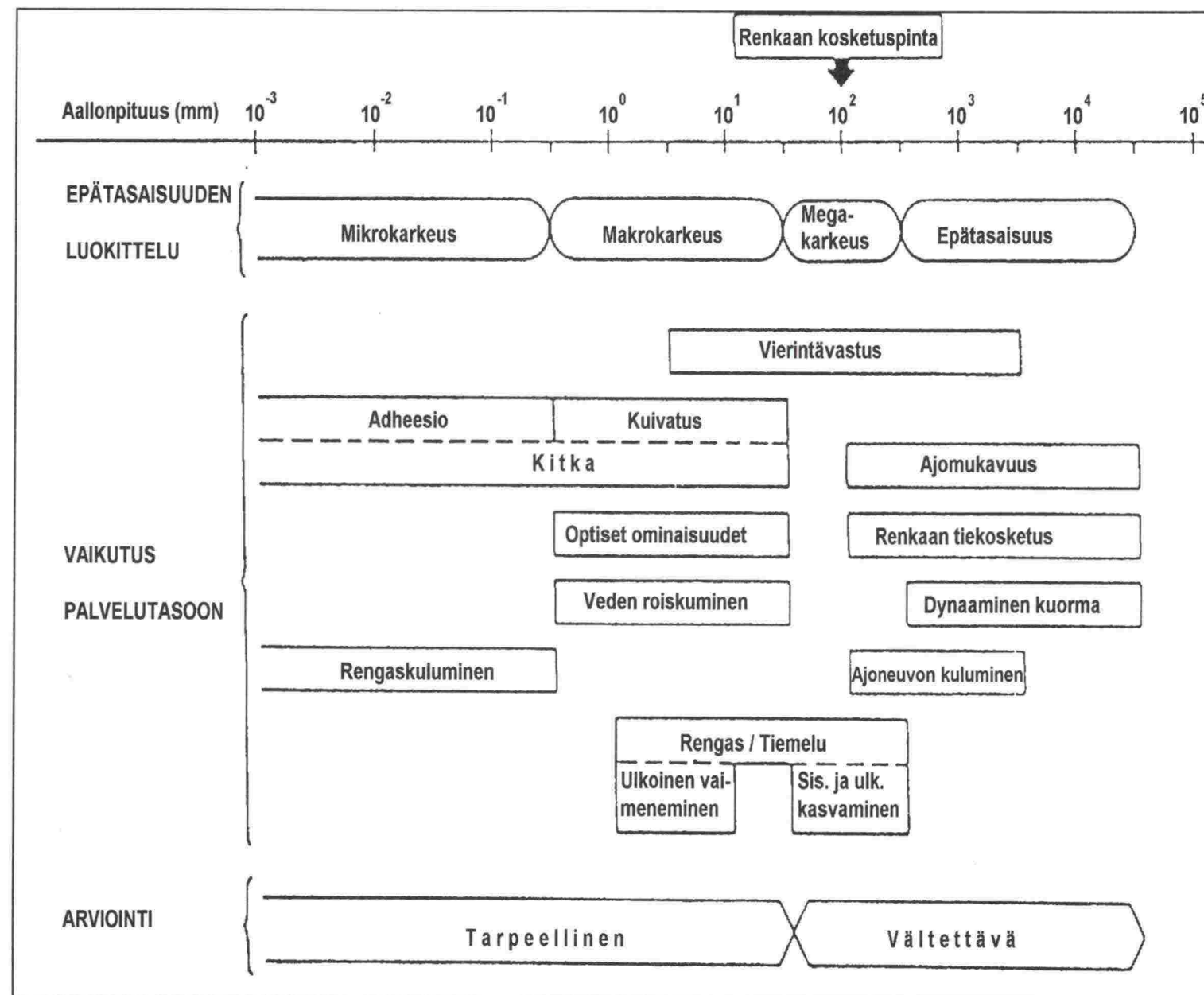
PUOLIPERÄVAUNUT:

Akselistoprofiilit/Rengastus	Lukumäärä
②	1
② ②	29
① ① ①	42
② ② ①	3
Yhteensä	75

TÄYSPERÄVAUNUT:

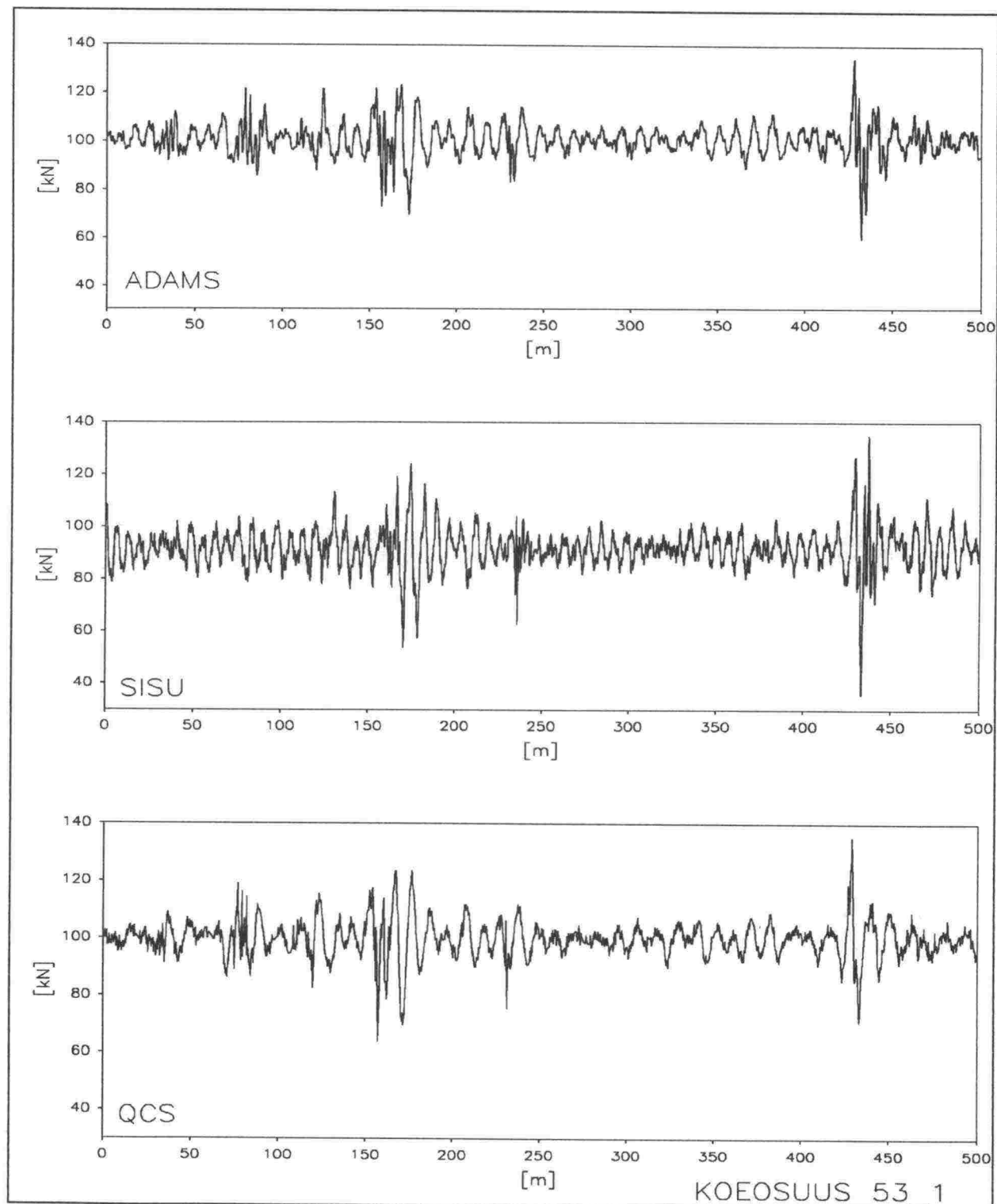
Akselistoprofiilit/Rengastus		Lukumäärä
Etuakselit	Taka-akselit	
①	①	1
②	②	12
②	① ②	10
①	① ①	8
①	② ②	1
②	① ①	2
②	② ②	54
① ①	① ①	7
② ②	② ②	54
②	① ① ①	4
②	① ② ②	2
②	② ② ②	7
Yhteensä		162

① = yksittäispyörä ② = paripyörä

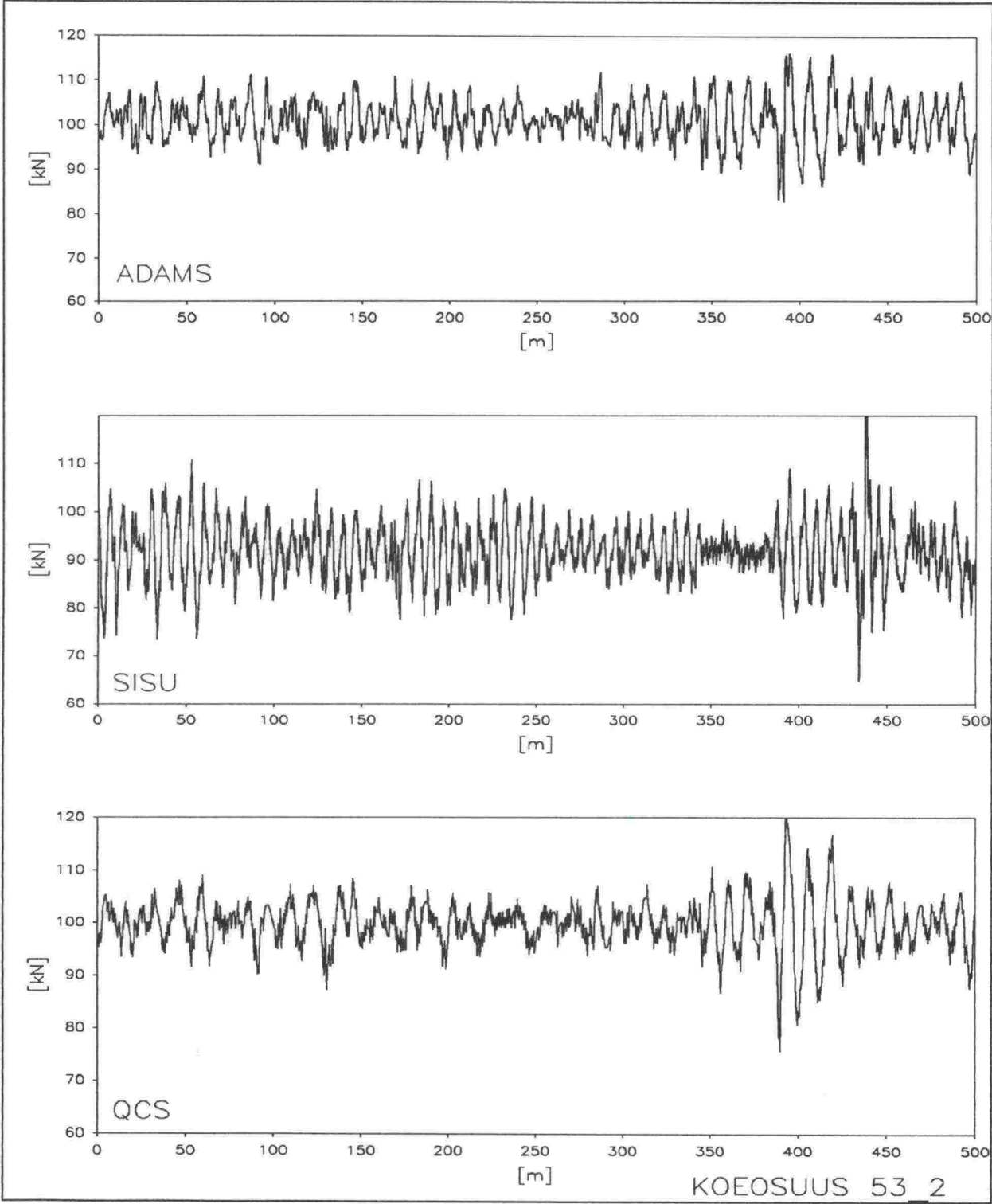


Epätasaisuuden luokittelu ja vaikutus tien palvelutasoon.

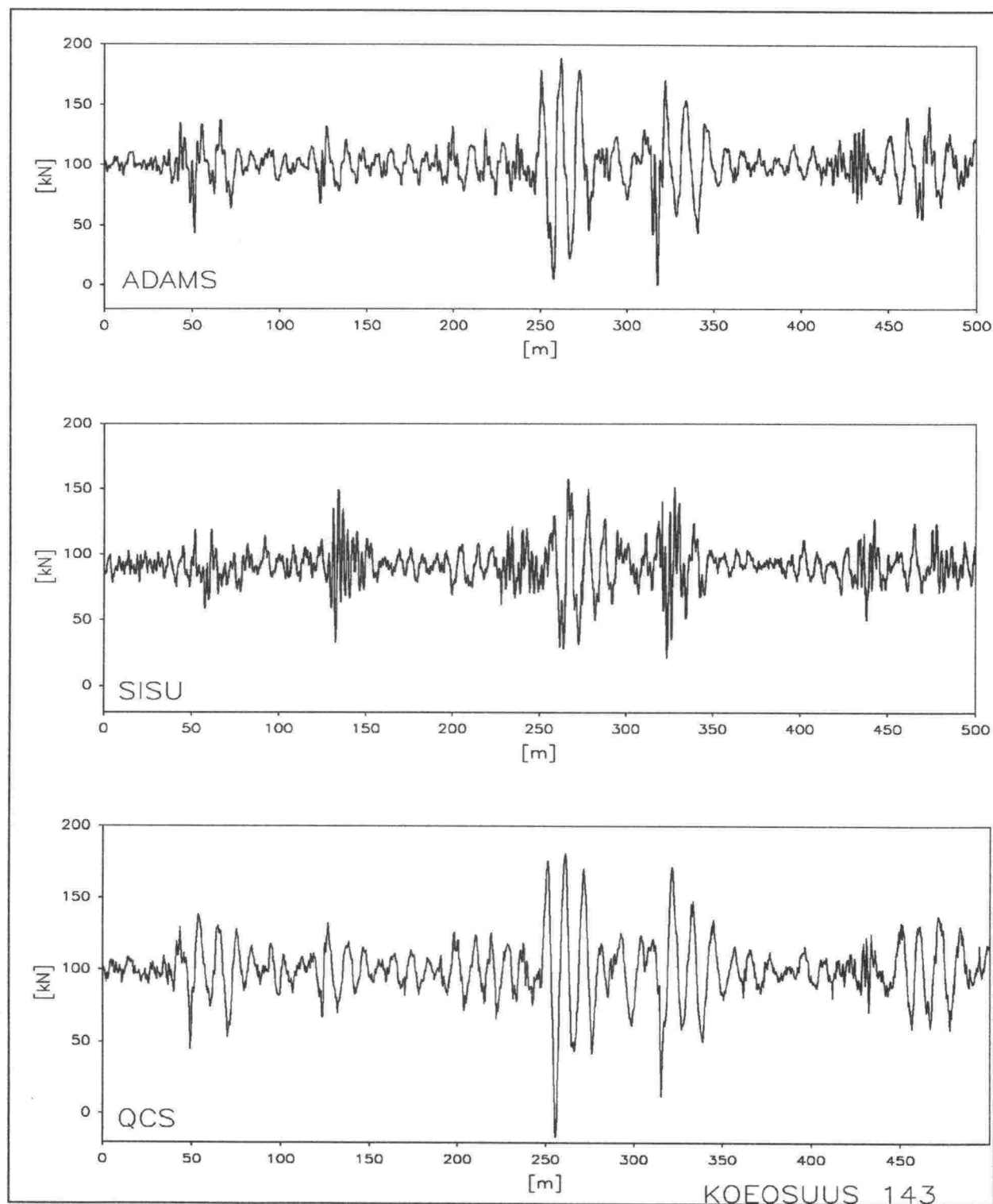
Dynaamiset akselipainot koeosuudella 53_1: ADAMS-simulointi, mitattu (Sisu) ja QCS-simulointi.



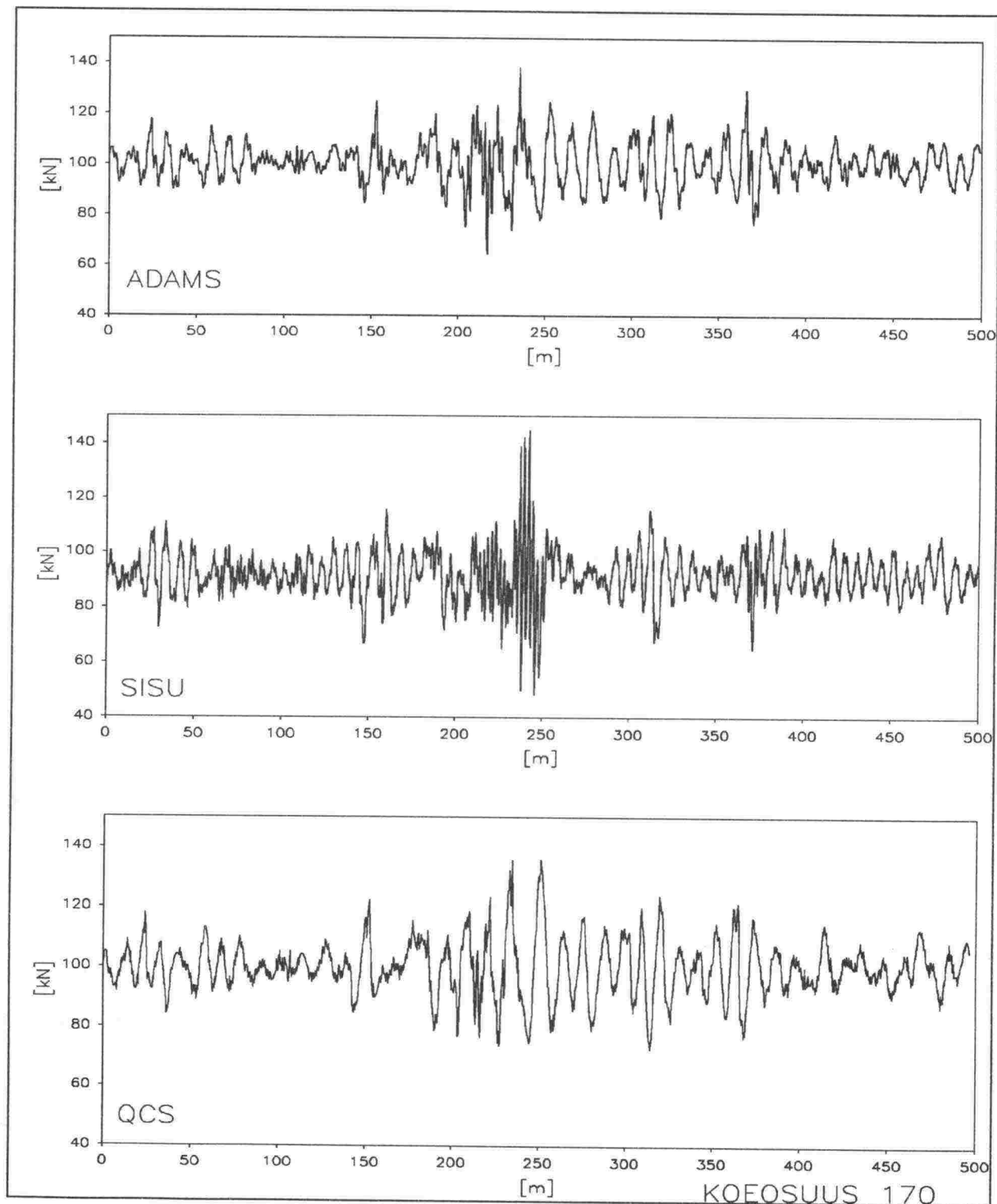
Dynaamiset akselipainot koeosuudella 53_2: ADAMS-simulointi, mitattu (Sisu) ja QCS-simulointi.



Dynaamiset akselipainot koeosuudella 143: ADAMS-simulointi, mitattu (Sisu) ja QCS-simulointi.



Dynaamiset akselipainot koeosuudella 170: ADAMS-simulointi, mitattu (Sisu) ja QCS-simulointi.



Koeosuuksien 53_1, 53_2, 143 ja 170 dynaamisten akselipainojen maksimiarvot ja niiden paikka yksittäisillä 100:lla metreillä: Mitattu (Sisu), ADAMS- ja QCS-simulointi.

KOEOSUUS	SISU		ADAMS		QCS	
	paikka [m]	maksimi [kN]	paikka [m]	maksimi [kN]	paikka [m]	maksimi [kN]
53_1/100	1	109	79	122	77	119
53_1/200	175	124	169	124	176	124
53_1/300	212	106	238	115	238	112
53_1/400	384	103	382	112	383	109
53_1/500	437	135	428	135	429	136
53_2/100	53	111	87	111	60	109
53_2/200	183	107	169	111	146	109
53_2/300	232	105	287	112	286	107
53_2/400	395	109	395	116	393	121
53_2/500	438	124	419	116	420	117
143/100	62	119	67	138	54	139
143/200	134	150	128	132	127	133
143/300	267	158	263	189	261	182
143/400	328	151	323	171	321	172
143/500	443	128	474	150	471	138
170/100	34	111	24	118	24	118
170/200	160	116	153	125	153	123
170/300	243	145	236	139	252	136
170/400	312	116	366	130	321	124
170/500	479	107	417	113	417	115

PROSENTTEINA:

KOEOSUUS	SISU		ADAMS		QCS	
	paikka [m]	maksimi [%]	paikka [m]	maksimi [%]	paikka [m]	maksimi [%]
53_1/100	1	118	79	123	77	119
53_1/200	175	135	169	124	176	124
53_1/300	212	115	238	115	238	112
53_1/400	384	112	382	113	383	109
53_1/500	437	147	428	136	429	136
53_2/100	53	121	87	112	60	109
53_2/200	183	116	169	112	146	109
53_2/300	232	114	287	113	286	107
53_2/400	395	119	395	117	393	121
53_2/500	438	134	419	117	420	117
143/100	62	130	67	139	54	139
143/200	134	163	128	133	127	133
143/300	267	171	263	190	261	182
143/400	328	165	323	172	321	172
143/500	443	139	474	151	471	138
170/100	34	121	24	119	24	118
170/200	160	126	153	126	153	123
170/300	243	158	236	140	252	136
170/400	312	126	366	131	321	124
170/500	479	116	417	114	417	115

SHRP-koeteiden IRI-arvot sekä DRI-arvot RMS- ja neljännen potenssin menetelmällä laskettuna (122_2.012 = Mt 122, tosa 012, 2. 100 metrin osuus).

KOE- OSUUS	IRI [mm/m]	RMS [kN]	4.po- tenssi	KOE- OSUUS	IRI [mm/m]	RMS [kN]	4.po- tenssi
122_2.012	2,07	104,6	123,9	3872_3.009	1,47	104,2	112,3
122_3.012	1,86	105,3	120,6	3872_4.009	1,64	104,4	137,4
122_4.012	1,64	104,6	123,1	4712_1.003	1,54	104,6	112,8
1672_1.005	1,60	104,5	121,5	4712_2.003	2,03	107,0	123,7
1672_2.005	2,83	108,9	126,9	4712_3.003	2,37	108,5	137,0
1672_3.005	1,36	104,5	112,6	4862_1.004	1,41	104,1	116,9
1672_4.005	1,70	105,8	125,1	4862_2.004	1,63	104,8	114,8
1672_5.005	1,69	105,0	122,1	4862_3.004	2,90	111,3	148,2
222_1.030	1,64	105,7	133,8	4862_4.004	1,43	104,3	106,1
222_2.030	1,64	107,0	137,9	4862_5.004	1,88	107,4	122,7
222_3.030	1,42	105,8	115,8	6042_1.004	1,42	104,9	119,7
222_4.030	1,19	103,2	108,4	6042_2.004	2,08	109,3	124,7
222_5.030	1,15	103,8	110,1	6042_3.004	1,21	104,6	110,0
232_1.403	0,96	102,8	108,0	6042_4.004	1,38	103,8	110,2
232_2.403	1,39	104,8	102,6	6222_1.002	1,47	105,5	123,2
232_3.403	1,24	103,7	119,5	6222_2.002	2,24	108,0	140,5
232_4.403	1,36	104,6	103,9	6222_3.002	2,25	108,5	135,4
232_5.403	1,28	104,1	137,7	6222_4.002	1,99	108,4	129,8
3242_1.002	2,33	108,9	134,4	6222_5.002	1,76	106,0	130,1
3242_2.002	2,74	110,7	143,7	62_1.348	1,42	105,0	141,3
3242_3.002	2,70	109,7	147,4	62_2.348	1,97	108,3	119,4
3242_4.002	2,52	109,2	141,4	62_3.348	1,43	104,6	113,5
3242_5.002	2,28	108,9	133,2	62_4.348	1,62	104,8	122,1
3252_1.001	1,70	105,0	130,5	62_5.348	1,45	104,2	108,4
3252_2.001	2,23	107,3	119,3	6372_1.003	1,95	107,1	133,2
3252_3.001	1,57	107,0	139,5	6372_2.003	2,16	106,6	127,7
3252_4.001	3,31	114,2	171,3	6372_3.003	1,62	105,8	114,5
3472_1.001	1,56	105,0	122,6	6372_4.003	1,31	104,8	132,0
3472_2.001	1,47	106,0	137,2	6372_5.003	1,71	107,1	135,1
3472_3.001	1,47	105,4	120,3	6373_1.004	2,32	107,6	132,7
3472_4.001	1,42	105,3	116,1	6373_2.004	2,20	107,0	130,8
3472_5.001	1,51	104,6	110,3	6373_3.004	2,15	107,2	121,4
3592_1.004	1,60	105,1	121,0	6373_4.004	1,67	105,4	117,4
3592_2.004	2,03	108,6	133,1	6373_5.004	1,51	106,1	128,3
3592_3.004	1,48	105,1	113,9	6412_1.001	2,01	106,3	146,9
3592_4.004	1,75	107,3	111,8	6412_2.001	2,48	107,8	126,7
3592_5.004	1,29	105,8	133,5	6412_3.001	1,94	106,1	114,9
3872_1.009	1,74	105,5	113,8	6412_4.001	1,50	104,4	114,5
3872_2.009	2,49	107,3	108,1	662_1.007	2,02	106,8	123,6

SHRP-koeteiden IRI-arvot sekä DRI-arvot RMS- ja neljännen potenssin menetelmällä laskettuna.

KOE- OSUUS	IRI [mm/m]	RMS [kN]	4.po- tehssi	KOE- OSUUS	IRI [mm/m]	RMS [kN]	4.po- tehssi
662_2.007	1,72	106,2	125,4	852_5.016	1,74	106,1	121,2
662_3.007	1,67	106,1	117,7	852_1.028	2,20	108,4	137,5
662_4.007	1,43	104,4	118,8	852_2.028	2,93	110,0	137,7
662_5.007	1,88	107,3	127,7	852_3.028	1,62	104,8	130,6
672_1.039	1,12	103,9	107,3	852_4.028	1,95	106,3	118,1
672_2.039	1,65	105,1	113,8	852_5.028	2,65	107,3	135,6
672_3.039	1,44	104,4	112,6	862_2.015	2,77	110,7	132,5
672_4.039	1,50	104,6	120,0	862_3.015	1,65	106,6	123,8
672_5.039	1,20	103,6	120,1	862_4.015	1,99	108,2	136,6
732_2.001	1,34	105,9	122,9	862_1.018	1,94	106,0	118,7
732_3.001	1,00	103,4	112,7	862_2.018	2,92	110,0	141,2
732_4.001	1,22	104,1	118,7	862_3.018	2,65	108,3	136,1
732_5.001	1,15	103,3	105,2	862_4.018	2,75	112,4	158,2
7492_1.004	1,55	105,9	136,5	862_5.018	2,29	107,4	134,1
7492_2.004	1,80	105,9	131,3	53_1/100	1,44	104,7	123,7
7492_3.004	1,35	104,0	125,6	53_1/200	2,40	109,7	144,2
7492_4.004	1,50	104,5	114,5	53_1/300	1,17	104,8	116,9
7492_5.004	1,28	103,4	114,7	53_1/400	0,95	104,0	131,6
752_1.022	1,03	103,1	115,3	53_1/500	1,78	107,0	135,3
752_2.022	1,28	103,6	109,6	53_2/100	1,05	103,4	125,1
752_3.022	1,25	104,2	102,9	53_2/200	1,28	103,9	108,4
752_4.022	1,02	103,2	111,7	53_2/300	0,83	102,6	113,8
772_1.032	1,58	105,1	119,4	53_2/400	1,35	106,2	126,2
772_2.032	1,41	103,9	120,0	53_2/500	1,31	106,2	117,1
772_3.032	1,42	104,3	113,2	143/100	3,50	114,5	164,3
772_4.032	1,71	104,8	111,6	143/200	2,98	110,7	151,9
7782_1.002	1,73	106,1	122,7	143/300	6,17	131,3	318,6
7782_2.002	1,70	105,0	118,9	143/400	4,42	122,3	234,3
7782_3.002	2,27	107,6	132,1	143/500	4,69	116,3	182,3
7782_4.002	2,08	108,1	146,1	170/100	1,52	105,6	109,3
7782_5.002	1,54	104,6	103,1	170/200	1,91	107,0	131,6
82_1.414	1,27	104,3	108,5	170/300	4,44	113,8	157,6
82_2.414	1,65	105,3	121,4	170/400	2,29	110,6	154,0
82_3.414	1,15	103,6	119,1	170/500	1,60	105,4	120,4
82_4.414	1,22	103,6	110,3	1271/100	3,12	109,7	137,7
852_1.016	1,88	106,7	129,7	1271/200	2,58	107,9	133,0
852_2.016	1,81	106,5	136,4	1271/300	2,56	106,8	121,6
852_3.016	1,97	107,4	125,9	1271/400	2,21	107,0	119,8
852_4.016	2,04	107,3	137,6	1271/500	2,16	105,6	139,4
TIE6/100	1,52	104,5	118,4	TIE7/100	2,40	108,8	135,2

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 52/1993 Road Condition Measurement and Pavement Management in Finland. TIEL 3200177E
- 53/1993 Pikavuorojen reitti-, liityntäliikenne- ja pysäkkijärjestelyjen kehittämminen. TIEL 3200178
- 54/1993 Pietarsaaren keskustauudistus; Saavutettavuuden ja vähittäiskaupan analyysi. TIEL 3200179
- 55/1993 Valtatie 3, vuoropuhelun arviointi. TIEL 3200180
- 56/1993 Betonipäällysteen valinta ja talous. TIEL 3200181
- 57/1993 Rakennuttamiskulttuuri; I - vaiheen raportti. TIEL 3200182
- 58/1993 Henkilöliikennetutkimus 1992. TIEL 3200183
- 59/1993 Valtatien 3 routamitoitus routanousun mukaan välillä Riihimäki P-Virala. TIEL 3200184
- 60/1993 Jännitys- ja muodonmuutosmittaukset tierakenteessa 1991-1992; Pohjaveden pinnan vaikutus, tienpinnan taipumamittaus eri lämpötiloissa, vertailu standardi paripyörä-Neste Oy:n kantavuusradan pyörä. TIEL 3200185
- 61/1993 Ylistaron keskustateiden suunnittelu asukkaiden näkökulmasta. TIEL 3200186
- 62/1993 Teknologian siirto; Yhteystiedot lähialueyhteistyössä. TIEL 3200187
- 63/1993 Nastallisten ja nastattomien talvirenkaiden pitotutkimus. TIEL 3200188
- 64/1993 Pellon kuivatus tien kohdalla. TIEL 3200189
- 65/1993 Tiesuolan pohjavesivaikutukset - kulkeutumismekanismien moni-ilmiömallinnus. TIEL 3200190
- 66/1993 Kokemuksia Japanin nastattomasta talviliikenteestä. TIEL 3200191
- 67/1993 Liikenneturvallisuus ja suolan käytön vähentäminen; Väli raportti väestön asenteista Kuopion läänin kokeiluun talvikaudella 1992-1993. TIEL 3200192
- 68/1993 Kuitukankaat tienrakennuksessa; Uudistetun VTT-GEO luokituksen mukaiset laatuvaatimukset. TIEL 3200193
- 69/1993 HLFM-maankäyttömalli, esiselvitys. TIEL 3200194
- 70/1993 Kalsiumkloridin käyttö tierakenteessa; Kirjallisuusselvitys ja laboratoriokokeet. TIEL 3200195
- 71/1993 Nonwoven Geotextiles in Road Constructions. TIEL 3200193E
- 72/1993 Yleisten teiden tilaselvitys; Meluntorjunta tiepiireissä. TIEL 3200196
- 73/1993 Valaistus taajamissa; Kuuden kohteen inventointi ja analysointi johtopäätöksineen. TIEL 3200197
- 74/1993 Dynaaminen rasitusindeksi (DRI). TIEL 3200198